

# 不同损伤模型下超高性能混凝土 SHPB 试验数值模拟对比

任亮<sup>1,2</sup>, 郑胜佩<sup>1</sup>, 蔡昂霖<sup>3</sup>, 郭忠照<sup>1</sup>, 喻贤明<sup>1</sup>

(1. 华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013; 2. 华东交通大学土木工程国家实验教学示范中心, 江西 南昌 330013; 3. 南昌中铁穗城轨道交通建设运营有限公司, 江西 南昌 330013)

**摘要** 目的 探讨不同损伤模型下超高性能混凝土 SHPB 试验数值模拟效果的差异性。方法 应用大型有限元程序 LS-DYNA, 结合 UHPC 材料特性, 明确了 KCC、HJC 和 CSC 模型中关键参数的取值, 建立了超高性能混凝土 SHPB 试验数值仿真模型。在此基础上, 开展不同损伤模型下 UHPC 试件波形、动态应力-应变曲线、弹性模量和动力增大系数(DIF)值模拟结果与实测结果的对比, 探讨不同损伤模型下超高性能混凝土 SHPB 试验动态破坏进程。结果 CSC 模型在低速冲击下能更好地模拟 UHPC 材料的实测波形和动态应力-应变曲线, 而在中高应变率下 KCC 模型和 HJC 模型得到的计算波形以及动态应力-应变曲线与实测值吻合度更好; 低应变率下三种损伤模型得到的 DIF 值相差不大, 但随着应变率提高, CSC 模型在一定程度上将低估 UHPC 材料的动力特性; UHPC 试件破碎程度随应变率的增加而增大, 相对于 CSC 模型在冲击破坏时表现出的核心存留现象, KCC 模型和 HJC 模型分别表现出明显的整体塌陷和边缘塌陷现象。结论 对于 UHPC 材料, CSC 模型适用于低速冲击下 SHPB 试验数值模拟, 而 KCC 模型和 HJC 模型适用于中高应变率下数值模拟。

**关键词** 不同损伤模型; UHPC; SHPB 试验; 数值模拟; 动态破坏进程

中图分类号 TU528; O347.4

文献标志码 A

## Comparison on Numerical Simulation of SHPB Test for Ultra-high Performance Concrete under Different Damage Models

REN Liang<sup>1,2</sup>, ZHENG Shengpei<sup>1</sup>, CAI Anglin<sup>3</sup>, GUO Zhongzhao<sup>1</sup>, YU Xianming<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Construction, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013;

收稿日期: 2022-12-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108141, 52068024); 江西省自然科学基金项目(20224BAB204055, 20224BAB214066)

作者简介: 任亮(1980—), 男, 博士, 主要从事 UHPC 构件抗震与抗冲击等方面研究。

2. National Experimental Teaching Demonstration Center of Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, China, 330013; 3. Nanchang China Railway Suicheng Rail Transit Construction and Operation Co. Ltd., Nanchang, China, 330013)

**Abstract:** To investigate the difference of numerical simulation effect of SHPB test on ultra high performance concrete under different damage models. Using LS-DYNA, a large finite element program, combined with UHPC material characteristics, the values of key parameters in KCC, HJC and CSC models were defined, and the numerical simulation model of SHPB test of ultra-high performance concrete was established. On this basis, the simulation results of UHPC specimen waveform, dynamic stress-strain curve, elastic modulus and dynamic increase coefficient (DIF) values under different damage models were compared with the measured results, and the dynamic failure process of ultrahigh performance concrete under SHPB test under different damage models was discussed. The CSC model can better simulate the measured waveforms and dynamic stress-strain curves of UHPC material at low speed impact, while the calculated waveforms and dynamic stress-strain curves obtained from KCC model and HJC model have better agreement with the measured values at medium and high strain rates. At low strain rate, the DIF values obtained by the three damage models have little difference, but with the increase of strain rate, the CSC model will underestimate the dynamic characteristics of UHPC material to a certain extent. The fracture degree of UHPC specimen increases with the increase of strain rate. Compared with the core retention phenomenon of CSC model during impact failure, KCC model and HJC model show obvious global collapse and edge collapse, respectively. For UHPC materials, CSC model is suitable for SHPB test numerical simulation under low speed impact, while KCC model and HJC model are suitable for numerical simulation under medium and high strain rate.

**Key words:** different damage models; UHPC; SHPB test; numerical simulation; dynamic damage process

超高性能混凝土(UHPC)是一种粗骨料细化、加入高性能外加剂、以硅灰和其他超细矿物作为掺合料的新型水泥基复合材料,具有优异的力学性能和耐久性能,以短节纤维作为增强和增韧材料,使其又具备其他混凝土不具备的良好韧性<sup>[1]</sup>。为适应 UHPC 结构在冲击或爆炸等极端荷载下的需求,对 UHPC 材料开展冲击试验是探讨其动态力学性能的重要途径。由于分离式霍普金森压杆(Split Hopkinson Pressure Bar, SHPB)试验可以覆盖结构大部分爆炸和冲击的应变率范围,不少学者应用 SHPB 技术对 UHPC 冲击性能开展了研究,结果表明, UHPC 试件在冲击作用下存在显著的应变率效应<sup>[2]</sup>,峰值应力、峰值应变、弹性模量以及耗能能力随应变率的增加而增大<sup>[3]</sup>, UHPC 材料表现出良好的抗冲击性能<sup>[4]</sup>。但考虑到 UHPC 材料动

力特性影响因素较多,而试验研究通常成本高、耗时长、数据离散性大,为此开展数值模拟研究是对其重要的补充。

LS-DYNA 软件作为一种大型非线性有限元程序,为用户提供了十余种混凝土损伤模型,其中 \* MAT\_72R3、\* MAT\_111 和 \* MAT\_159 模型因其能较好地反映混凝土材料在冲击荷载下的应变率效应、软化、失效、损伤演化等动态性能,而被广泛应用于模拟混凝土材料的冲击性能<sup>[5]</sup>。针对 UHPC 材料,任亮等<sup>[6]</sup>基于校准的 Karagozian-Case-Concrete(KCC)冲击损伤模型,探讨了 SHPB 试验中径向惯性效应对 UHPC 试件应力平衡的影响,给出了高应变率下 UHPC 试件长径比的合理取值范围。徐世烺等<sup>[7]</sup>基于校准的 Holmquist-Johnson-Cook(HJC)冲击损伤模型指出,随着应变率增加, UHPC 材料的

动态应力-应变曲线呈现出由应变硬化主导向损伤软化主导的转变趋势。任亮等<sup>[8]</sup>结合 UHPC 的材料特性,校准了 HJC 模型中关键参数的取值,探讨了强度参数 A 与参考应变率之间的相关性。W. Guo 等<sup>[9]</sup>基于 UHPC 单轴和三轴压缩试验数据,校准了 Continuous-Surface-Cap(CSC)冲击损伤模型中关键参数的取值,分析了 UHPC 梁在低速落锤冲击下的动力性能。贾鹏程等<sup>[10]</sup>进一步指出 CSC 模型对 UHPC 梁出现的剪胀效应描述较差。

虽然应用上述三种损伤模型目前已实现了对 UHPC 动力冲击特性的数值研究,但考虑到三种损伤模型在不同冲击应变率下反映材料复杂应力行为的差异性,导致模拟效果不尽相同,而现有的研究针对 UHPC 材料在三种损伤模型下的动力学行为对比鲜有文献涉及。基于此,笔者应用大型有限元程序 LS-DYNA,结合 UHPC 材料特性,明确 KCC、HJC 和 CSC 模型中关键参数的取值,建立超高性能混凝土 SHPB 试验数值仿真模

型。在此基础上,将不同损伤模型下 UHPC 试件波形、动态应力-应变曲线、弹性模量和 *DIF* 值模拟结果与实测结果进行对比,探讨不同损伤模型下超高性能混凝土 SHPB 试验动态破坏进程。

## 1 基于 UHPC 材料的损伤模型参数确定

### 1.1 KCC 模型参数确定

KCC 模型通过定义三个独立的剪切破坏面来控制混凝土类材料处理复杂应力条件下的非线性行为<sup>[11]</sup>,应用线性插值函数考虑当前应力状态的损伤累积。其中剪切破坏面由参数  $a_{0y}$ 、 $a_{1y}$ 、 $a_{2y}$ 、 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_{1f}$ 、 $a_{2f}$  来确定,三个剪切破坏面之间的应力通过损伤函数  $\eta$  和等效塑性应变  $\lambda$  来确定。为准确描述混凝土材料模型的压缩行为,KCC 模型通过体积应变  $\varepsilon_v$ 、静水压力  $P$  和卸载体积模量  $K$  来确定状态方程。笔者在文献[6]中基于 UHPC 材料特性,结合 KCC 模型的特点,明确了上述控制参数的取值,结果见表 1 和表 2。

表 1 KCC 模型剪切破坏面参数

Table 1 Parameters of the shear failure surface in KCC model

$a_{0y}$	$a_{1y}$	$a_{2y}$	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_{1f}$	$a_{2f}$
29.081	0.285 17	0.003 802	89.58	0.502 7	0.003 623	0.317 98	0.001 69

表 2 KCC 模型损伤方程、状态方程参数

Table 2 Parameters of the damage function and equation of state in KCC model

$\lambda$	$\eta$	$\varepsilon_v$	$P/\text{MPa}$	$K/\text{MPa}$
0	0	0	0	26 433
0.000 008	0.90	-0.007 034 0	185.9	26 433
0.000 02	0.98	-0.028 960 0	240	6 568
0.000 06	0.99	-0.050 981 0	390	6 812
0.000 17	1.00	-0.062 837 0	565	14 760
0.000 21	0.78	-0.072 613 0	737	17 594
0.000 31	0.45	-0.144 392 0	2 000	17 596
0.000 61	0.30	-0.216 174 0	3 263	17 595
0.001	0.25	-0.287 950 0	4 526	17 596
0.001 65	0.20	-0.359 729 0	5 789	17 596
0.003 3	0.012	—	—	—
0.007	0.001	—	—	—
100	0	—	—	—

1.2 HJC 模型参数确定

HJC 模型作为一种与应变率相关的材料损伤模型,其本构关系通过损伤函数和静水压力-体积应变关系来确定<sup>[12]</sup>,模型中相应的控制参数包括基本参数、损伤参数、压力参数和强度参数。

基本参数包含了材料的密度  $\rho$ 、单轴抗压强度  $f'_c$ 、抗拉强度  $T$  和剪切模量  $G$ ,一般可按 UHPC 材料实测数据取值;损伤参数包含了损伤函数中控制材料损伤程度的参数  $D_1$  和  $D_2$ ,以及材料破坏时最小塑性应变  $\varepsilon_{fmin}$ ;压力参数包含了控制静水压力-体积应变状

态方程的完全压实材料参数  $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$ ,材料进入弹性极限时的静水压力  $P_{crush}$  和体积应变  $\mu_{crush}$ ,以及材料完全压实时的静水压力  $P_{lock}$  和体积应变  $\mu_{lock}$ ;强度参数包含控制屈服面方程的归一化内聚强度系数  $A$ 、归一化压力系数  $B$ 、应变率系数  $C$ 、应变硬化指数  $N$ 、参考应变率  $\dot{\varepsilon}_0$  和最大归一化强度  $S_{max}$ 。笔者在文献[8]中基于 UHPC 材料特性,通过应力-压力归一化曲线,结合分阶段反求法,得到损伤参数、压力参数和强度参数,结果见表3。

表3 HJC 模型损伤参数、压力参数和强度参数

Table 3 Parameters of the damage,pressure and strength in HJC model							
$D_1$	$D_2$	$\varepsilon_{fmin}$	$K_1/\text{GPa}$	$K_2/\text{GPa}$	$K_3/\text{GPa}$	$P_{crush}/\text{GPa}$	$\mu_{crush}$
0.832	1.0	0.02	85	-171	208	$66.7 \times 10^{-3}$	$2.52 \times 10^{-3}$
$P_{lock}/\text{GPa}$	$\mu_{lock}$	$A$	$B$	$C$	$N$	$\dot{\varepsilon}_0/\text{s}^{-1}$	$S_{max}$
1.130	0.117	1.54	1.29	0.007	0.36	1	3.5

1.3 CSC 模型参数确定

CSC 模型通过屈服面方程(包含剪切破坏面方程和盖帽硬化面方程)、损伤方程以及应变率效应方程来表征混凝土材料的硬化、损伤及应变率效应<sup>[13]</sup>。其中剪切破坏面由压缩子午线(参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\lambda$ 、 $\theta$ )、剪切子午线(参数  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ 、 $\lambda_1$ 、 $\theta_1$ )和拉伸子午线(参数  $\alpha_2$ 、 $\beta_2$ 、 $\lambda_2$ 、 $\theta_2$ )共同确定;盖帽硬化面方程参数包含了盖帽初始位置  $X_0$ 、最大塑性应变  $W$ 、线性形状参数  $D_1$ 、二次形状参数  $D_2$  和盖帽面长轴与短轴的比值  $n$ ;损伤方程参数包含了塑性形状软化参数  $B$ 、单轴受压断裂能  $G_{fc}$ 、脆性形状软化参数  $D$ 、单轴受拉断裂能  $G_{ft}$ 、纯剪断裂能  $G_{fs}$ 、剪压转换参数  $PWRC$ 、剪拉转换参数  $PWRT$  和自定义软化参数  $PWRD$ ;应变率效应方程参数包含了单轴受压应变率效应参数  $\eta_{oc}$ 、单轴受压应变率效应功率  $N_c$ 、单轴受拉应变率效应参数  $\eta_{ot}$ 、单轴受拉应变率效应功率  $N_t$ 、受压最大允许过应力  $OVERC$ 、受拉最大允许过应力  $OVERT$ 、有效

剪应力与拉应力流动参数的比值  $SRATE$  和通过应变率效应增加断裂能的功率  $REPOW$ 。

文献[9]结合 UHPC 材料性能,给出了上述参数的取值(见表4),其中参数  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\lambda$ 、 $\theta$ 、 $n$  和  $X_0$  与 UHPC 单轴抗压强度  $f'_c$  相关,相应的拟合方程如下:

$$\alpha = -2.381 \times 10^{-5} f_c'^2 + 0.8064 f'_c + 21.78 . \tag{1}$$

$$\theta = -2.381 \times 10^{-7} f_c'^2 + 1.357 \times 10^{-4} f'_c + 0.1306 . \tag{2}$$

$$\lambda = 8.333 \times 10^{-5} f_c'^2 + 0.7168 f'_c + 18.8 . \tag{3}$$

$$\beta = 5.381 \times 10^{-8} f_c'^2 - 3.187 \times 10^{-5} f'_c + 6.93 \times 10^{-3} . \tag{4}$$

$$n = 5.024 \times 10^{-4} \times f_c'^2 - 0.1429 \times f'_c + 12.88 . \tag{5}$$

$$X_0 = 0.0204 \times f_c'^2 - 1.232 \times f'_c + 104.87 . \tag{6}$$

表 4 CSC 模型参数

Table 4 Parameters in CSC model( UHPC)

$N_H$	$C_H$	$\alpha_1/\text{MPa}$	$\theta_1$	$\lambda_1/\text{MPa}$	$\beta_1/\text{MPa}^{-1}$	$\alpha_2/\text{MPa}$	$\theta_2$
1	0	1.0	0	0.422 6	$8.406 \times 10^{-4}$	1.0	0
$\lambda_2/\text{MPa}$	$\beta_2/\text{MPa}^{-1}$	$W$	$D_1/\text{MPa}^{-1}$	$D_2/\text{MPa}^{-2}$	$B$	$G_{fc}/(\text{MPa}\cdot\text{mm})$	$D$
0.5	$8.406 \times 10^{-4}$	0.05	$2.5 \times 10^{-4}$	$3.492 \times 10^{-7}$	100	24.19	5 000
$G_{ft}/(\text{MPa}\cdot\text{mm})$	$G_{fs}/(\text{MPa}\cdot\text{mm})$	$PWRC$	$PWRT$	$PWOD$	$\eta_{0c}$	$N_c$	$\eta_{0t}$
6.48	6.48	5	1	0	$1.146 \times 10^{-3}$	0.78	$1.794 \times 10^{-4}$
$N_T$	$OVERC/\text{MPa}$	$OVERT/\text{MPa}$	$SRATE$	$REPOW$			
0.48	147.25	36.65	1	0.5			

2 冲击压缩数值仿真模型

应用大型有限元程序 LS – DYNA, 分别选用文献[14 – 16]中不同应变率下超高性能混凝土 SHPB 试验, 建立冲击压缩数值仿真模型。三组文献中整形器均采用铜质, 相应的材料参数见表 5。其中文献[14]中整形器材料直径和厚度分别为 20 mm 和 2.5 mm, UHPC 试件直径和长度分别为 56 mm 和

26 mm, 相应的单轴抗压强度为 165 MPa, 应变率为  $60\text{ s}^{-1}$ ; 文献[15]中整形器直径和厚度分别为 10 mm 和 2 mm, UHPC 试件直径和长度分别为 23.8 mm 和 9.2 mm, 相应的单轴抗压强度为 200 MPa, 应变率为  $92.03\text{ s}^{-1}$ ; 文献[16]中整形器直径和厚度分别为 6 mm 和 1 mm, UHPC 试件直径和长度分别为 36 mm 和 17.5 mm, 相应的单轴抗压强度为 125 MPa, 应变率为  $166\text{ s}^{-1}$ 。

表 5 波形整形器材料参数

材料	密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	体积弹性模量/MPa	泊松比	屈服强度/MPa	剪切模量/MPa	塑性硬化模量/MPa
铜	8 920	140 000	0.35	70	48 000	334

各杆件的特征参数见表 6。其中文献[14]中的入射杆为全长 3 200 mm 的直锥变截面杆, 靠近撞击杆端为长 50 mm、直径 37 mm 的等直径段, 之后采用长 400 mm、直

径由 37 mm 渐变为 74 mm 的过渡段, 再采用直径 74 mm 的等直径杆; 文献[15]和文献[16]中分别采用直径为 25.4 mm 和 40 mm 的等截面杆。

表 6 杆件特征参数

设备	长度/mm			直径/mm			密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量/ $10^5\text{ MPa}$	泊松比
	文献 [14]	文献 [15]	文献 [16]	文献 [14]	文献 [15]	文献 [16]			
撞击杆	305	305	305	37	25.4	40	9 150	2	0.3
入射杆	3 200	3 658	1 800	37 ~ 74	25.4	40	9 150	2	0.3
透射杆	1 800	3 658	1 800	74	25.4	40	9 150	2	0.3

注: 37 ~ 74 表示在直锥变截面入射杆中直径由 37 mm 渐变为 74 mm 的一段过渡段。

SHPB 数值仿真模型示意图如图 1 所示。模型中各构件均采用 solid164 实体单元, 为降低负体积的影响, 在杆件与试件、杆

件与整形器接触部分的单元进行适当网格细分, 具体网格划分见表 7。为消除端面摩擦效应的影响, 各构件之间端面接触均采用自



动面面接触。为准确模拟冲击过程中大变形构件动态弹塑性力学行为,选用 Plastic-Kinematic 模型作为整形器的材料模型,选用

前述参数校准后的 KCC、HJC、CSC 模型分别作为 UHPC 试件的动态损伤模型。

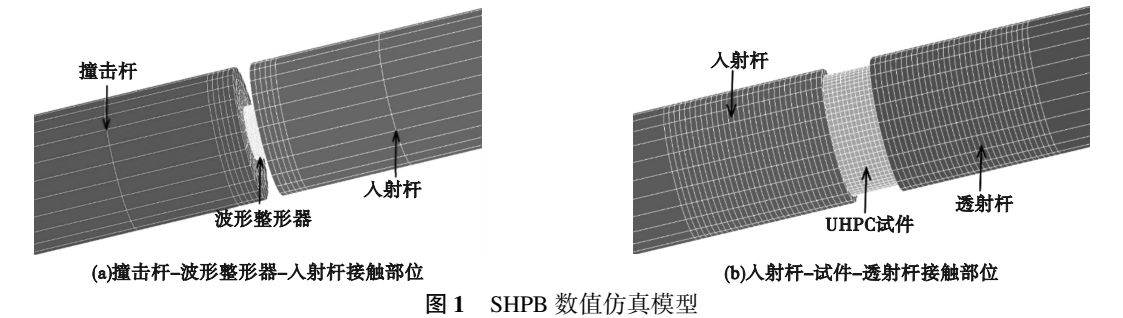


图 1 SHPB 数值仿真模型

Fig. 1 Numerical simulation model of SHPB

表 7 模型网格划分

Table 7 Model meshing

项目	径向划分量/个	径向单元长度/mm			纵向划分量/个	纵向单元长度/mm		
		文献[14]	文献[15]	文献[16]		文献[14]	文献[15]	文献[16]
撞击杆	6	3.08	2.12	3.33	30	10	10	10
撞击杆-波形整形器接触	6	3.08	2.12	3.33	5	1	1	1
波形整形器	16	0.63	0.31	0.19	32	0.08	0.06	0.03
波形整形器-入射杆接触	6	3.08	2.12	3.33	5	1	1	1
入射杆	6	3.08~6.17	2.12	3.33	90	35	40	20
入射杆-试件接触	6	6.17	2.12	3.33	30	1	1	1
试件	25	1.12	0.48	1.13	15	1.73	0.61	1.17
试件-透射杆接触	6	6.17	2.12	3.33	30	1	1	1
透射杆	6	6.17	2.12	3.33	90	20	40	20

注:3.08~6.17 表示在直锥变截面入射杆中径向单元长度由 3.08 mm 渐变为 6.17 mm 的一段过渡段。

3 损伤模型模拟结果对比

基于上述数值分析方法,分别选用校准后的 KCC 模型、HJC 模型和 CSC 模型,对文献[14-16]中 SHPB 试验开展数值仿真分析。

3.1 波形对比

不同损伤模型下实测波形和计算波形的对比如图 2 所示。从图中可以看出,在低应变率时( $60\text{ s}^{-1}$ ),相对于 KCC 模型和 HJC 模型,CSC 模型得到的计算波形与实测波形吻合度更高,表明 CSC 模型在低速冲击下具有更好的模拟效果。此后随着应变率的提高,CSC 模型得到的透射波下降段和反射波上

升段相对于实测波形表现出一定偏差,且这种偏差在应变率达到  $166\text{ s}^{-1}$  时显著增大;而 KCC 模型和 HJC 模型在中高应变率下计算波形与实测波形保持较好的吻合度。这是由于 CSC 模型通过盖帽面的膨胀和收缩来模拟材料的塑性变形,考虑到中高应变率下 UHPC 试件产生较大的变形,盖帽面的膨胀和收缩不足难以描述 UHPC 试件的塑性变形,导致试件部分单元提前出现失效,大大影响了计算结果的准确性;而 KCC 模型和 HJC 模型分别通过剪切破坏面和塑性体积应变的累积来控制材料的损伤行为,能更好地描述 UHPC 材料内部孔隙压实以及纤维的桥接效应,进而取得较好的模拟效果。

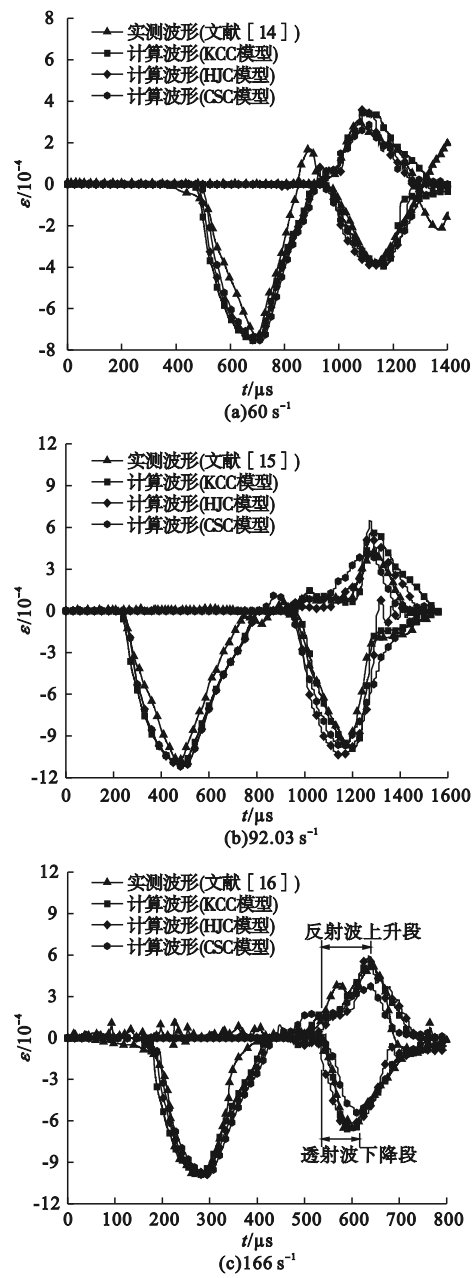


图2 实测波形与计算波形对比

Fig.2 Comparison of the measured and calculated waveforms

3.2 动态应力-应变曲线对比

为进一步探讨不同损伤模型下 UHPC 材料在冲击作用下的应变硬化和损伤软化特征,图3给出了不同损伤模型下动态应力-应变曲线。从图中可以看出,在低应变率时(60 s<sup>-1</sup>),由 CSC 模型得到的计算曲线上升段和下降段与实测曲线吻合度优于另外两种

模型,表明基于路边钢筋混凝土防护结构与车辆碰撞而开发的 CSC 模型对低速冲击具备更好的适用性。随着应变率提高,HJC 模型和 KCC 模型得到的计算曲线与实测曲线吻合度逐渐提升,而 CSC 模型得到的计算曲线与实测曲线逐渐偏离,且损伤软化段出现

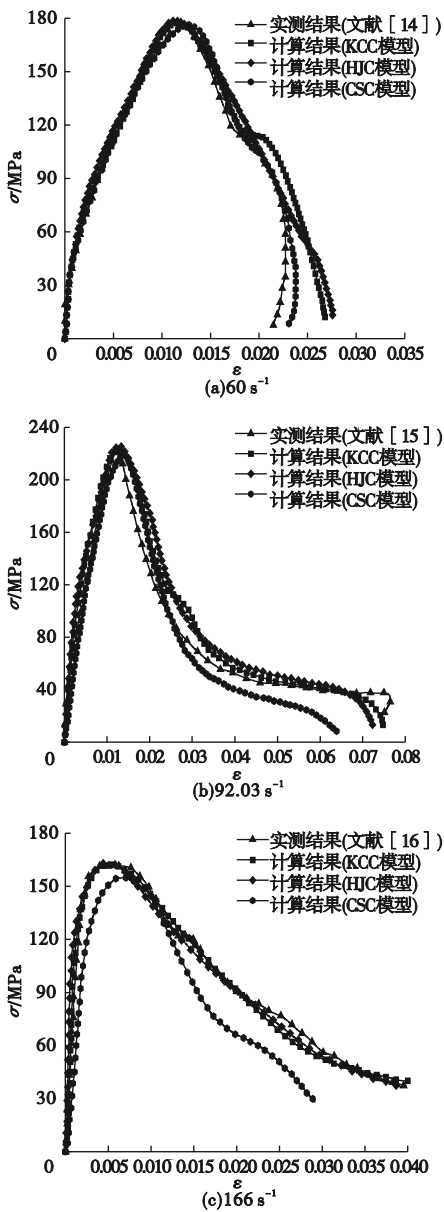


图3 UHPC 动态应力-应变曲线实测结果与计算结果对比

Fig.3 Comparison on the dynamic stress-strain curves between the measured and simulated results for UHPC

快速下降,这是由于中高应变率下 UHPC 试件将产生较大的变形,CSC 模型中盖帽面的膨胀和收缩不足使试件部分单元提前失效所致。

为进一步探讨 KCC 模型、HJC 模型和 CSC 模型模拟效果的差异性,图 4 和图 5 分别给出了不同损伤模型下 UHPC 弹性模量和 *DIF* 实测值与计算值对比,其中弹性模量定义为图 3 中上升段 0.4 倍峰值应力对应的割线弹性模量<sup>[17-18]</sup>。

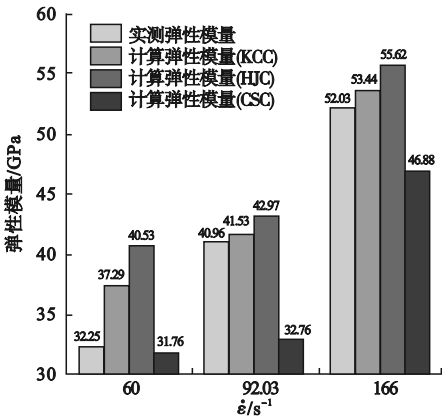


图 4 不同损伤模型下 UHPC 的弹性模量实测值与计算值对比

Fig. 4 Comparison on the elastic modulus between the measured and simulated results for UHPC under different damage models

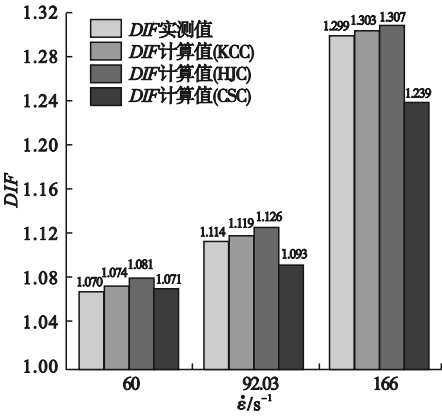


图 5 不同损伤模型下 UHPC 的 *DIF* 值实测值与计算值对比

Fig. 5 Comparison on the *DIF* values between the measured and simulated results for UHPC under different damage models

从图 4 中可以看出,三种损伤模型模拟得到的结果从大到小依次为 HJC 弹性模量值、KCC 弹性模量值、CSC 弹性模量值,且在低应变率下 CSC 模型弹性模量计算值与实测值偏差最小;但随着应变率提高,CSC 模型弹性模量模型计算值与实测值偏差逐渐减小,这与前述三种模型下波形曲线和动态应力-应变曲线对比表现一致。在中高应变率下,相对于 HJC 模型,KCC 弹性模量模型计算值与实测值更吻合,这是由于 KCC 模型基于状态方程解耦体积变形响应和剪切响应来描述材料的压缩行为,能更为真实地反映出 UHPC 材料的内部损伤。而 HJC 模型中静水压力-体积应变状态方程由线弹性段、塑性应变阶段和完全压实阶段组成,导致 UHPC 材料内部空隙没有足够的时间实现完全压实,只能通过增强试件动态损伤能力(如弹性模量、动态抗压强度)的方式来实现能量平衡。

从图 5 可以看出,三种损伤模型得到的 *DIF* 值在低应变率下相差不大,但在中高应变率( $92.03\text{ s}^{-1}$ 、 $166\text{ s}^{-1}$ )下,CSC 模型得到的 *DIF* 值明显小于实测值,这是由于中高应变率下,CSC 模型的盖帽面膨胀和收缩不足,难以准确描述 UHPC 试件的塑性变形,导致试件部分单元在达到动态抗压强度时提前出现失效,从而降低了模拟效果。

3.3 动态破坏进程对比

为进一步探讨不同损伤模型下 UHPC 试件在冲击荷载下的动态破坏进程,图 6 给出了文献[14-16]中 UHPC 试件在三种损伤模型下的动态破坏进程。图中试件上端为靠近入射杆端,下端为靠近透射杆端。单元失效准则(\*MAT\_ADD\_EROSION)通过定义最大失效主应变  $\epsilon_{\max}$  来控制,即在冲击过程中自动删除 UHPC 试件塑性应变超过最大失效主应变  $\epsilon_{\max}$  的单元。



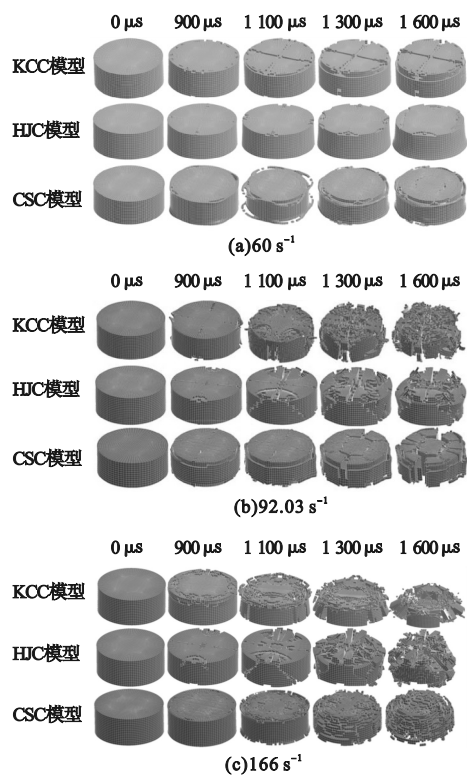


图6 不同损伤模型下 UHPC 试件的动态破坏进程

Fig. 6 Dynamic damage processes of UHPC specimens under different damage models

从图6可以看出,三种材料损伤模型得到的 UHPC 试件动态破坏进程具有以下共同点:①在冲击加载初期,试件破坏首先发生在边缘单元,试件的核心单元基本上未发生失效破坏,这是由于在冲击作用下,试件轴向受到冲击压缩作用而使径向受到环向拉伸作用,从而导致试件发生轴向压缩变形和边缘单元发生径向拉伸破坏。②随着冲击荷载的增大,UHPC 试件内部薄弱层逐渐发展出微裂缝,而且这些微裂缝逐渐聚集,最后贯通成一条或几条宏观裂缝,导致试件最终破坏。③UHPC 试件破碎程度随应变率的增加而增大,在低应变率时( $60\text{ s}^{-1}$ ),试件呈裂而不碎,但随着应变率提高,裂缝开始贯穿整个试件,当应变率为 $166\text{ s}^{-1}$ 时,试件的破坏形态呈明显的块状。

与此同时,三种材料损伤模型得到的 UHPC 试件的动态破坏进程也具备以下不同

点:①对于 KCC 模型,不同冲击应变率下单元失效由边缘单元逐渐发展到核心单元,试件整体出现压缩变形,表现出明显的整体塌陷现象。②HJC 模型模拟的试件破坏进程与 KCC 模型类似,单元失效均逐渐向内发展,但 HJC 模型的边缘单元比 KCC 模型破坏程度更小,并且核心单元出现向外迸裂,即表现出明显的边缘塌陷现象。③对于 CSC 模型,单元失效由边缘单元发展到中部单元,但没有进入核心区域,由中部单元沿着核心单元形成一个环状破坏区域,核心单元在中部单元的约束作用下失效破坏较少,表现出明显的核心存留现象。

4 结 论

(1)CSC 模型在低速冲击下能更好地模拟 UHPC 材料的实测波形和动态应力 - 应变曲线,而在中高应变率下 KCC 模型和 HJC 模型得到的计算波形以及动态应力 - 应变曲线与实测值吻合度更好。

(2)低应变率下三种损伤模型得到的 *DIF* 值相差不大,CSC 模型得到的弹性模量计算值与实测值偏差最小。但随着应变率提高,CSC 模型得到的弹性模量、*DIF* 值与实测值逐渐偏离,将在一定程度上低估 UHPC 材料的动力特性。

(3)在冲击加载初期,三种材料损伤模型得到的冲击破坏均发生在 UHPC 试件边缘单元,随着冲击荷载的增大,微裂缝逐渐向试件内部发展,且 UHPC 试件破碎程度随应变率的增加而增大。相对于 CSC 模型在冲击破坏时表现出的核心存留现象,KCC 模型和 HJC 模型分别呈现出明显的整体塌陷和边缘塌陷现象。

参考文献

[1] 马新伟,薛欢,祁锦明,等. 基于氯离子渗透机制的超高性能混凝土生命周期预测[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(1): 22 - 30.  
(MA Xinwei, XUE Huan, QI Jinming, et al.

- Life cycle prediction of ultra-high performance concrete based on chloride ion permeation mechanism [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(1): 22 – 30. )
- [2] YU Q L, ZHUANG W T, SHI C J. Research progress on the dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete under high strain rates [J]. Cement and concrete composites, 2021, 124: 104258.
- [3] HASSAN M, WILLE K. Comparative experimental investigations on the compressive impact behavior of fiber-reinforced ultra high-performance concretes using split Hopkinson pressure bar [J]. Construction and building materials, 2018, 191: 398 – 410.
- [4] HUANG H H, GAO X J, KHAYAT K H. Contribution of fiber orientation to enhancing dynamic properties of UHPC under impact loading [J]. Cement and concrete composites, 2021, 121: 104108.
- [5] 余道兴, 宗周红, 李明鸿, 等. 基于不同材料模型的混凝土 SHPB 试验数值模拟[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2017, 47(1): 124 – 129.  
(YU Daoxing, ZONG Zhouhong, LI Minghong, et al. Numerical simulation of concrete SHPB test based on different material models [J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2017, 47(1): 124 – 129. )
- [6] 任亮, 何瑜, 王凯, 等. 基于 SHPB 的 UHPC 冲击试验径向惯性效应分析[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(10): 132 – 144.  
(REN Liang, HE Yu, WANG Kai, et al. Radial inertia effect analysis of UHPC impact test based on SHPB [J]. Explosion and shock waves, 2019, 39(10): 132 – 144. )
- [7] 徐世烺, 陈超, 李庆华, 等. 超高韧性水泥基复合材料动态压缩力学性能的数值模拟研究[J]. 工程力学, 2019, 36(9): 50 – 59.  
(XU Shiliang, CHEN Chao, LI Qinghua, et al. Numerical simulation on dynamic compressive behavior of ultrahigh toughness cementitious-composites [J]. Engineering mechanics, 2019, 36(9): 50 – 59. )
- [8] 任亮, 喻贤明, 王凯, 等. 基于 HJC 模型的 UHPC 冲击压缩性能数值研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(10): 1 – 9.  
(REN Liang, YU Xianming, WANG Kai. et al. Numerical study on impact compression behavior of UHPC using HJC model [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021, 38(10): 1 – 9. )
- [9] GUO W, FAN W, SHAO X D, et al. Constitutive model of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete for low-velocity impact simulations [J]. Composite structures, 2018, 185: 307 – 326.
- [10] 贾鹏程, 吴昊, 方秦. 基于 CSC 模型的 UHPC 构件侧向低速冲击分析[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(8): 169 – 182.  
(JIA Pengcheng, WU Hao, FANG Qin. Low-velocity lateral impact analyses of UHPC members based on CSC model [J]. Journal of building structures, 2021, 42(8): 169 – 182. )
- [11] 任亮, 何瑜, 王凯. 基于整形器的 UHPC 材料 SHPB 试验数值模拟与分析[J]. 振动与冲击, 2019, 38(21): 44 – 52.  
(REN Liang, HE Yu, WANG Kai. Numerical simulation and analysis of SHPB test for UHPC material based on pulse shaper [J]. Journal of vibration and shock, 2019, 38(21): 44 – 52. )
- [12] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for concrete subjected to larger strains, high strain rates and high pressure [C]. 14th International Symposium Ballistics, USA: American Defense Preparedness Association, 1995.
- [13] MURRAY Y D. Users manual for LS-DYNA concrete material model 159 [R]. United States: Federal Highway Administration, Office of Research, Development and Technology, 2007.
- [14] 鞠杨, 盛国华, 刘红彬, 等. 高应变率下 RPC 动态力学性能的试验研究[J]. 中国科学: 技术科学, 2010, 40(12): 1437 – 1451.  
(JU Yang, SHENG Guohua, LIU Hongbin, et al. Experimental study of dynamic mechanical properties of reactive powder concrete under high-strain-rate impacts [J]. Science China technological sciences, 2010, 40(12): 1437 – 1451. )
- [15] HASSAN M, WILLE K. Experimental impact analysis on ultra-high performance concrete (UHPC) for achieving stress equilibrium (SE) and constant strain rate (CSR) in split Hopkinson pressure bar (SHPB) using pulse shaping technique [J]. Construction and building materials, 2017, 144: 747 – 757.
- [16] HOU X M, CAO S J, ZHENG W Z, et al. Experimental study on dynamic compressive properties of fiber-reinforced reactive powder concrete at high strain rates [J]. Engineering structures, 2018, 169: 119 – 130.
- [17] 董海龙, 彭有开, 骆开静, 等. 粗骨料取代下的高性能再生混凝土率敏性研究[J]. 实验力学, 2019, 34(2): 70 – 78.  
(DONG Hailong, PENG Youkai, LUO Kaijing, et al. Study on rate sensitivity of high performance recycled concrete with different coarse aggregate replacement ratios [J]. Journal of experimental mechanics, 2019, 34(2): 70 – 78. )
- [18] 刘数华. 高性能再生骨料混凝土试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2009, 25(2): 262 – 266.  
(LIU Shuhua. Experimental study on high performance recycled aggregate concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2009, 25(2): 262 – 266. )
- (责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)