

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0002

## 混凝土高压状态方程实验与数值模拟研究\*

孙玉祥<sup>1</sup>, 王杰<sup>1,2</sup>, 武海军<sup>1</sup>, 周婕群<sup>3</sup>, 李金柱<sup>1</sup>, 皮爱国<sup>1</sup>, 黄风雷<sup>1</sup>

- (1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;
2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999;
3. 中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为研究高压下混凝土冲击压缩特性以及确定 HJC 本构模型状态方程参数, 采用  $\varnothing 58$  mm 火炮加载技术和多普勒探针系统 (Doppler probe system, DPS) 测速技术, 对抗压强度为 26.5 MPa (C25) 和 42.1 MPa (C40) 的混凝土进行反向平板撞击实验研究与数值模拟。DPS 探针记录 TU1 无氧铜靶自由面粒子速度历史, 根据一维应变弹塑性波理论, 计算撞击压力, 拟合得到 2~11 GPa 高压条件下混凝土波速与粒子速度 ( $u_s-u_p$ )、压力与体积应变 ( $p-\mu$ ) 关系。实验结果表明: 高压条件下, 混凝土波速-粒子速度呈线性关系; 两种初始密度、孔隙率相近, 强度不同的混凝土波速-粒子速度、压力-体积应变关系存在明显差异, 相同压力下, 混凝土试件强度越高, 体积应变越小。基于实验结果, 确定了两种强度混凝土 HJC 本构模型状态方程参数, 利用 LS-DYNA 动力有限元分析软件对平板撞击实验进行了数值模拟, 靶板自由面粒子速度历史与实验曲线吻合较好, 仿真结果表明混凝土中冲击波的追赶卸载现象仅存在于低速撞击条件下。

**关键词:** 混凝土; 平板撞击; 状态方程; HJC; 无氧铜

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Experiment and simulation on high-pressure equation of state for concrete

SUN Yuxiang<sup>1</sup>, WANG Jie<sup>1,2</sup>, WU Haijun<sup>1</sup>, ZHOU Jiequn<sup>3</sup>, LI Jinzhu<sup>1</sup>, PI Aiguo<sup>1</sup>, HUANG Fenglei<sup>1</sup>

- (1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;
3. Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

**Abstract:** To study the dynamic compression characteristics of concrete under high hydrostatic pressure and to determine the equation of state parameters of the HJC constitutive model, inverse flyer-impact tests and numerical simulation analysis were conducted with two kinds of concrete flyers of which the compressive strengths were 26.5 MPa and 42.1 MPa, respectively. The concrete flyers were launched by  $\varnothing 58$  mm gun against TU1 copper targets. The particle velocity histories of the TU1 copper target free surface were measured by DPS (Doppler probe system). Based on the one-dimensional strain shock wave theory, the impact pressure was calculated. The relationships of shock velocity vs. particle velocity and pressure vs. volume strain in the pressure range of 2–11 GPa were fitted. The results show that the relationship between shock velocity and particle velocity of concrete is linear. The relationships of shock velocity vs. particle velocity and pressure vs. volume strain for concretes with similar initial density and porosity but different compressive strengths are obviously different. Under the same pressure, the higher the compressive strength of concrete, the smaller the volume strain is. According to the test results, the equation of state parameters of the HJC constitutive model were determined and the plate-impact tests were simulated by LS-DYNA. The simulated particle velocity histories of the TU1 target free surface were in good agreement with the experimental

\* 收稿日期: 2020-01-02; 修回日期: 2020-06-09

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U1730128); 国家自然科学基金(11390362, 11572048)

第一作者: 孙玉祥(1993—), 男, 硕士, 1762566576@qq.com

通信作者: 武海军(1974—), 男, 博士, 教授, wuhj@bit.edu.cn

results. The simulation results show that the phenomenon of chasing and unloading of shock waves in concrete only exists under low velocity impact conditions.

**Keywords:** concrete; flyer-impact; equation of state; HJC; oxygen free copper

混凝土是一种脆性多孔材料,因其出色的抗压性能、低廉的造价,广泛应用于防护工事的建造中。在爆炸或高速侵彻、碰撞过程中,高压荷载作用于混凝土局部区域,混凝土材料处于高静水压力状态。在这种状态下,材料的抗畸变能力(即剪切强度)可近似地忽略不计,此时,其本构关系简化成为静水压力 $p$ 与体积应变 $\mu$ 之间的关系,混凝土可以视为无黏性的可压缩流体<sup>[1]</sup>。

Holmquist等<sup>[2]</sup>提出了基于大应变、高应变率、高压力的混凝土HJC(Holmquist-Johnson-Cook)本构模型,其状态方程表述为压力与体积应变的关系。其中,压实段 $p$ - $\mu$ 关系修正为 $p$ - $\bar{\mu}$ , $\bar{\mu}$ 为压实的体积应变,压实段起点对应的压实密度来自Grady<sup>[3]</sup>混凝土材料,并以花岗岩和石英的冲击Hugoniot状态等效混凝土压实状态,拟合得到 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ ,该模型参数被广泛应用,但其用岩石类材料等效混凝土方法的准确性有待商榷。

Gebbeken等<sup>[4-5]</sup>、Riedel等<sup>[6-7]</sup>、王永刚等<sup>[8]</sup>对不同强度混凝土材料开展平板撞击实验,得到了用于构建混凝土高压状态方程的冲击Hugoniot数据,通过对比,可发现不同强度混凝土其压力与密度关系不一致,材料强度是其状态方程的影响因素之一。此外,Grady等<sup>[9]</sup>开展了压力范围3~25 GPa的平板撞击实验,分析了Hugoniot应力与残余应变的关系,认为混凝土冲击压缩下的压力-体积关系与混凝土孔隙和强度有关;Kipp等<sup>[10]</sup>获得了两种骨料尺寸的混凝土在0.08~0.55 GPa低压力段的平板撞击实验数据,并拟合得到波速与粒子速度关系;Hall等<sup>[11]</sup>探究了密度接近、骨料尺寸ASTM编号分别为57和7的两种混凝土高压状态差异,发现骨料尺寸对实验中混凝土加载与卸载响应影响不大;Tsembelis等<sup>[12-13]</sup>通过平板撞击实验验证了不含骨料的水泥砂浆与含骨料的混凝土状态方程无明显差别,后将撞击压力提高至18 GPa,研究了水泥砂浆的剪应力强度和失效破坏。综上所述,静水压力为2 GPa以上的平板撞击实验数据较少;其次,多项实验结果验证了骨料对混凝土高压状态方程无明显影响,而不同抗压强度的混凝土状态方程存在明显差异,表明了混凝土高压下的体积压缩特性与其基体抵抗压缩的能力有关。当前,同时开展多个强度混凝土状态方程的实验研究极少,缺乏对混凝土状态方程强度相关性的作用机理的深入认识。

因此,本文中基于火炮发射技术,对实测抗压强度为26.5 MPa和42.1 MPa的混凝土开展一维应变条件下的反向平板撞击实验,压力范围为2~11 GPa,拟合出混凝土材料在该压力范围的波速与粒子速度( $u_s$ - $u_p$ )、压力-体积应变( $p$ - $\mu$ )关系。对比以往实验研究结果,分析混凝土抗压强度对其一维应变条件下压缩特性的作用机理。依据孔隙率确定混凝土压实密度,确定了HJC模型高压段状态方程参数,通过反向平板撞击数值模拟与实验结果对比,验证模型参数的准确性,并讨论冲击波在混凝土材料中的传播特点。

## 1 平板撞击实验

### 1.1 实验装置与试样

利用 $\varnothing 58$  mm的火炮驱动混凝土飞片以 $v_0$ 的初速度撞击TU1无氧铜靶板,撞击产生的平面冲击波传播至靶板自由面,造成自由面表面粒子速度变化,由安装在自由面后的多普勒探针系统(Doppler probe system, DPS)的探针探测并记录粒子速度变化,实验装置如图1所示,图2为DPS测速装置与靶室布置情况。撞击过后,由于飞片与靶板横截面尺寸远大于其厚度,质点微团相互约束,不能侧向移动,处于三向应力状态,近似为一维应变条件。

测速装置DPS的时间分辨率为 $50 \text{ s}^{-1}$ ,位移分辨率为 $0.5 \text{ }\mu\text{m}$ ,测速范围为 $0.1 \text{ m/s} \sim 9 \text{ km/s}$ ,测速误差不超过1%,可保证测速精准。根据实验需求,共布置7路DPS探针,探针1和探针2位于靶板中心;探针3~6沿以靶板中心为圆心、半径10 mm的圆周均匀分布,其测量数据可与探针1和探针2的数据对比,排除飞片骨料与基体不均匀性的影响,并且可根据探针3~6粒子速度变化的先后时间,计算飞片的碰靶角度;探针7距离靶板中心26 mm,用于测量飞片的碰靶速度。

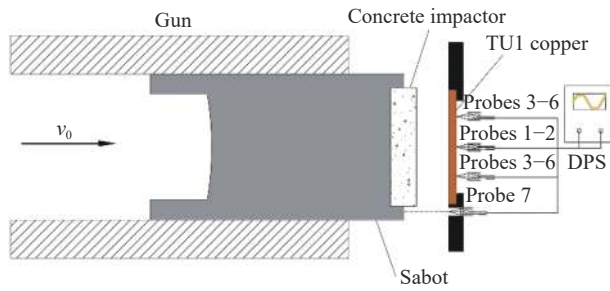


图 1 飞片撞击实验装置示意图

Fig. 1 Flyer-impact experimental device

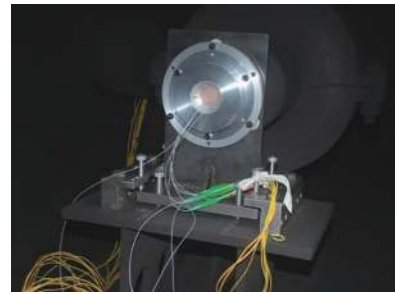


图 2 DPS 测速装置与靶室布置

Fig. 2 DPS and target room arrangement

为防止飞片与靶板侧向稀疏波对中心区域冲击波的干扰, 保证冲击波是均匀的平面波, 飞片与靶板宽厚比须大于 2<sup>[14]</sup>。因此, 混凝土飞片设计厚度为 12 mm, 直径 50 mm, 端面平行度在 0.05 mm 以内, 表面平整度在 0.02 mm 以内, 骨料的直径 2~5 mm; 混凝土飞片试件, 如图 3 所示, 飞片和弹托, 如图 4 所示。靶板材料使用密度为 8 930 kg/m<sup>3</sup> 的 TU1 无氧铜, 直径 40 mm, 厚度 4 mm, 实验前打磨去除金属氧化层, TU1 无氧铜靶片见图 5。



图 3 混凝土飞片试件

Fig. 3 Concrete flyer specimen

实验设计两种强度混凝土, 由 42.5R 水泥、煤灰、中砂、细骨料按一定配比浇注而成, 养护 28 d。C25 混凝土实测抗压强度为 26.5 MPa, 密度为 2 201.7 kg/m<sup>3</sup>, 孔隙率为 14.59%; C40 混凝土实测抗压强度为 42.1 MPa, 密度为 2 176.8 kg/m<sup>3</sup>, 孔隙率为 15.73%。



图 4 飞片与弹托

Fig. 4 Flyer and sabot



图 5 TU1 无氧铜靶片试件

Fig. 5 TU1 copper specimen

为获得压力不低于 2 GPa 的混凝土状态数据, 拟开展 C25 和 C40 混凝土飞片实验各 4 发, C25 飞片拟发射速度分别为 500、1 000、1 200、1 500 m/s, C40 飞片拟发射速度分别为 800、1 000、1 200、1 500 m/s。

## 1.2 实验原理

当飞片以  $v_0$  的初速度撞击靶板后, 压缩波从飞片与靶板撞击界面向两侧传播, 波传播的  $X-t$  如图 6 所示。

由于冲击波在 TU1 无氧铜中的传播速度快, 压缩波在  $t_1$  时刻到达靶板自由面, 引起表面粒子速度跳跃。同时, 自由面向介质内部反射拉伸波, 而拉伸波经撞击界面反射为压缩波于  $t_2$  时刻再次传播至靶板自由面, 粒子速度再次跳跃, DPS 探针可记录到图 7 中 2 次压缩波到达自由面时间间隔(经估算约 2.03  $\mu$ s)内的粒子速度平台, 其幅值大小为  $u_{p1}$ 。

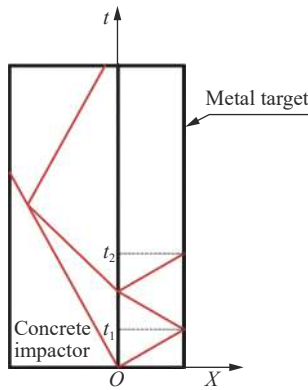


图 6 冲击波传播 X-t 图  
Fig. 6 Shock wave propagation

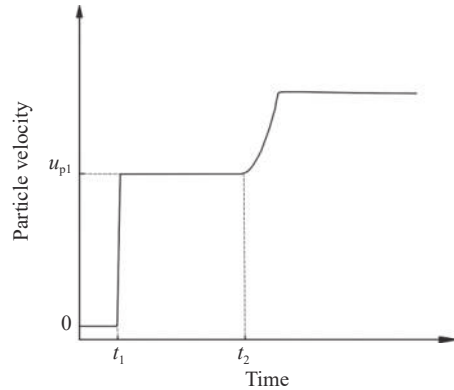


图 7 TU1 靶板自由面粒子速度历史示意图  
Fig. 7 Particle velocity history curve on TU1 target

已知 TU1 无氧铜波速  $u_{s1}$  与粒子速度  $u_{p1}$  关系如下:

$$u_{s1} = c_b + S_1 u_{p1} \tag{1}$$

式中: TU1 无氧铜体波波速  $c_b=3\ 940\ \text{m/s}$ , 其冲击波波速与粒子速度 ( $u_s-u_p$ ) 关系斜率  $S_1=1.489$ 。

冲击波在 TU1 无氧铜靶板中的传播满足 Hugoniot 跳跃条件, 可求得靶板中的冲击 Hugoniot 应力  $\sigma_H$ :

$$\sigma_H = \rho_1 c_b \left( \frac{1}{2} u_{p1} \right) + \rho_1 S_1 \left( \frac{1}{2} u_{p1} \right)^2 \tag{2}$$

由于飞片与靶板撞击界面的连续性,  $\sigma_H$  同为飞片的 Hugoniot 应力。一维应变条件下, Hugoniot 应力  $\sigma_H$  与静水压力  $p$  满足<sup>[15]</sup>:

$$\sigma_H = p + \frac{4\tau_{\max}}{3} \tag{3}$$

式中:  $\tau_{\max}$  表示混凝土最大剪应力, 远小于  $\sigma_H$ , 可忽略不计。因此:

$$p \approx \sigma_H \tag{4}$$

在混凝土飞片中应用 Hugoniot 跳跃条件, 可分别求得飞片中的波速  $u_{s2}$  与粒子速度  $u_{p2}$ :

$$u_{s2} = \frac{p}{\rho_0 u_{p2}} \tag{5}$$

$$u_{p2} = v_0 - \frac{1}{2} u_{p1} \tag{6}$$

Grady<sup>[9]</sup>、Gebbeken 等<sup>[4-5]</sup> 的实验结果表明, 混凝土材料的冲击绝热关系可拟合为  $u_s=Su_p+c$  形式, 得到系数  $S$  和截距  $c$ 。根据质量守恒和动量守恒方程, 由下式:

$$p = \frac{\rho_0 c^2 (\rho - \rho_0)}{[\rho(1-S) + S\rho_0]^2} \tag{7}$$

$$\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1 \tag{8}$$

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu(1-\mu)}{[(1-S)\mu + 1]^2} \tag{9}$$

即可计算实验中各个静水压力值  $p$  对应的密度  $\rho$ 、体积应变  $\mu$ 。

### 1.3 实验结果与分析

每发实验均可获得 6 路 DPS 探针数据, 图 8 为 C40 混凝土飞片以 989 m/s 的速度撞击 TU1 无氧铜



靶板自由面粒子速度历史影像图, 6 路探针原始影响经图像算法处理得到图 9 所示靶板自由面粒子速度历史数据。为消除混凝土飞片不均性导致的数据误差, 对各实验工况数据取 6 路探针数据的平均值如图 10~11 所示。取粒子速度第一平台段平均值为  $u_{p1}$ , 依据式 (1)~(6) 计算 Hugoniot 应力  $\sigma_H$ , 混凝土波速  $u_s$  和粒子速度  $u_p$ , 表 1 为混凝土平板撞击实验数据处理结果。经测算, 8 组平板撞击实验最大碰靶角度为  $0.31^\circ$ , 可近似认为混凝土飞片与无氧铜靶板发生正撞击。

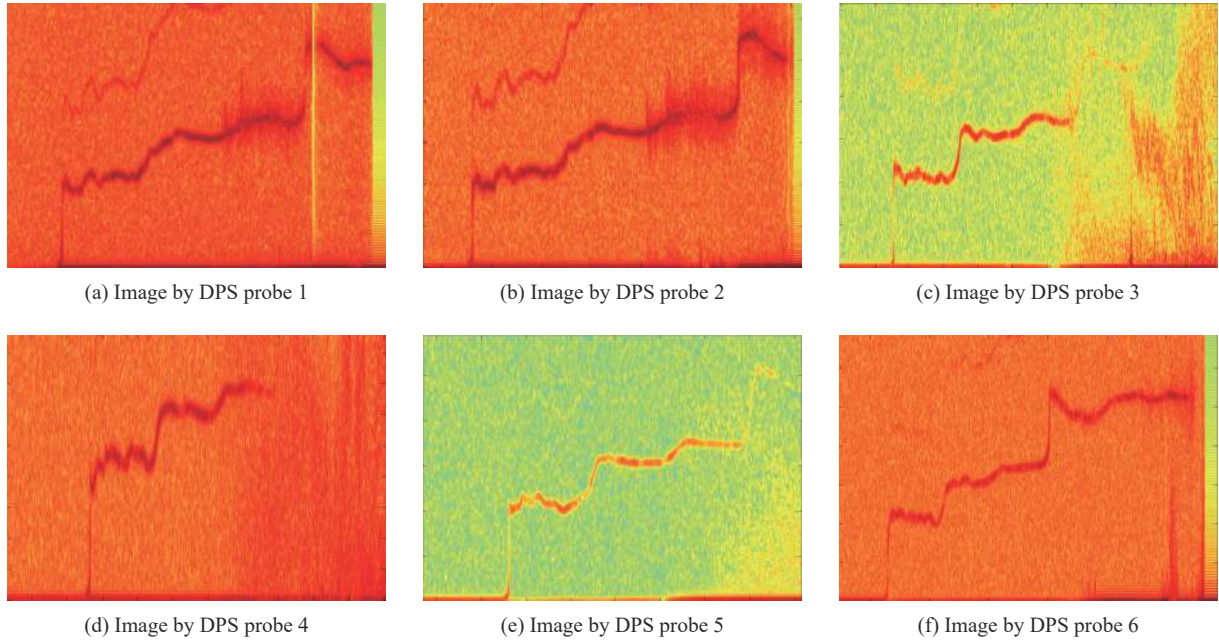


图 8 6 路 DPS 探针原始影像图  
Fig. 8 Images by six DPS probes

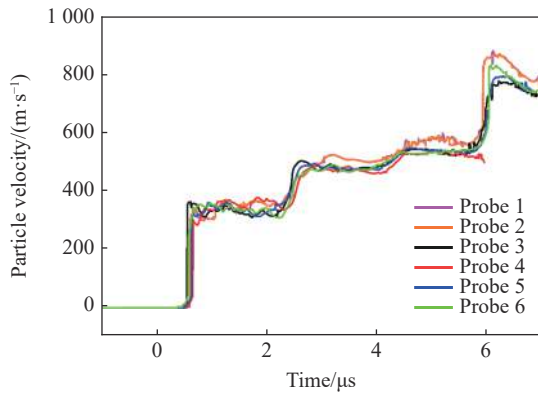


图 9 速度为 989 m/s 的 C40 混凝土飞片撞击 TU1 靶板的自由面粒子速度历史

Fig. 9 Particle velocity of TU1 free surface in C40 concrete flyer impact test at 989 m/s

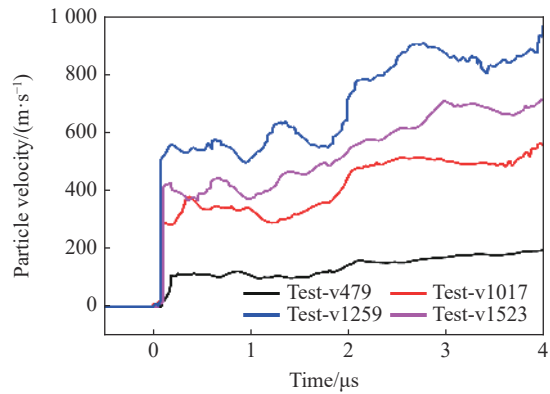


图 10 C25 混凝土飞片撞击 TU1 靶板自由面粒子速度历史

Fig. 10 Particle velocity of TU1 free surface in C25 concrete flyer impact tests

分别对 C25 和 C40 混凝土波速与粒子速度关系作线性拟合, 如图 12 所示, C25 拟合关系式为  $u_s = 2.39(\pm 0.27)u_p + 1251.7(\pm 254.7)$ , C40 拟合关系式为  $u_s = 1.82(\pm 0.27)u_p + 2194.3(\pm 257.9)$ 。由式 (7)~(9) 计算得到各个静水压力值  $p$  对应的密度  $\rho$ 、体积应变  $\mu$ , 如图 13~14 所示。

平板撞击实验结果表明, 对于同一强度的混凝土试件, 其密度、体积应变随着静水压力的升高而增大。微观上, 在高静水压力作用下, 材料分子或原子间距离缩小, 造成微观尺度上极小的体积压缩; 宏观

上,混凝土是一种多孔脆性材料,由于孔隙分布的随机性,质点微团在复杂的应力状态下发生剪切断裂,孔隙塌陷,表现出密度、体积应变的显著变化。

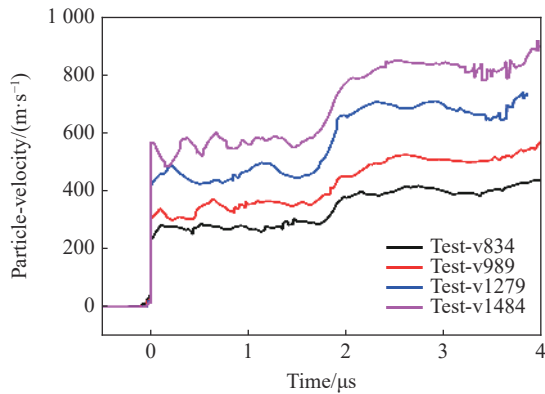


图 11 C40 混凝土飞片撞击 TU1 靶板自由面粒子速度历史

Fig. 11 Particle velocity of TU1 free surface in C40 concrete flyer impact tests

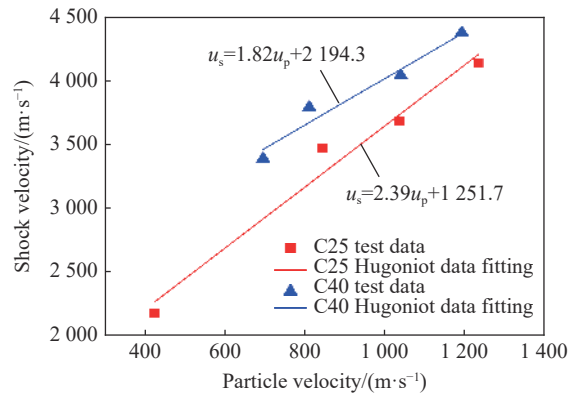


图 12 混凝土波速-粒子速度( $u_s-u_p$ )关系拟合

Fig. 12 Shock velocity and particle velocity linear fitting

表 1 混凝土平板撞击实验数据

Table 1 Flyer-impact test data of concrete

编号	类别	$v_0/(m \cdot s^{-1})$	$u_{p1}/(m \cdot s^{-1})$	$u_{p2}/(m \cdot s^{-1})$	$u_{s2}/(m \cdot s^{-1})$	$\sigma_H/MPa$
C25v1017	C25	1017	343.9	845.0	3469.7	6450.4
C25v1259	C25	1259	441.0	1038.5	3682.8	8414.2
C25v1523	C25	1523	575.6	1235.2	4136.2	11240.0
C25v479	C25	479	112.6	422.7	2177.6	2025.1
C40v834	C40	834	276.3	695.8	3383.8	5121.2
C40v989	C40	989	355.5	811.3	3786.7	6681.6
C40v1279	C40	1279	476.1	1040.9	4037.4	9140.6
C40v1484	C40	1484	580.6	1193.7	4370.9	11348.0

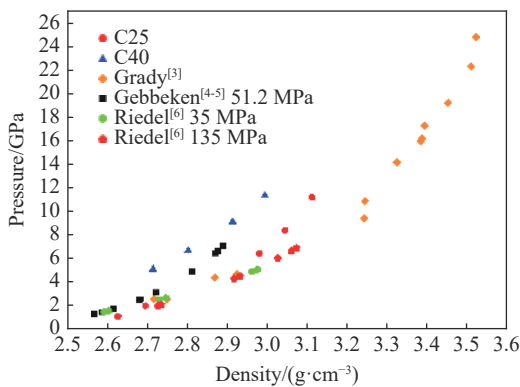


图 13 混凝土压力-密度

Fig. 13 Pressure-density data for concrete

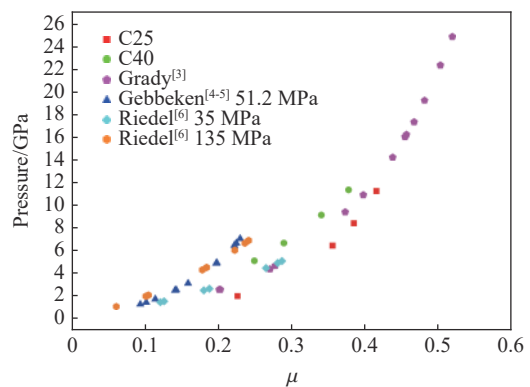


图 14 混凝土压力-体积应变

Fig. 14 Pressure-volumetric strain data for concrete

此外,对比 C25 和 C40 混凝土压力体积应变关系发现,初始密度、孔隙率相近,强度不同混凝土压力与体积应变数据曲线是接近平行、区别明显的两条线,相同的静水压力  $p$  作用下,混凝土强度越高,体积应变越小。Grady<sup>[9]</sup>、Kipp 等<sup>[10]</sup>、Hall 等<sup>[11]</sup> 已通过实验排除骨料对混凝土状态方程的影响,在初始密

度、孔隙率接近的前提下, 基体强度越高, 质点微团发生剪切断裂需要达到的应力状态越高, 孔隙塌陷越不完全, 体积更难被压缩减小, 因此体积应变更小。

## 2 HJC 状态方程参数确定

如图 15 所示, 混凝土状态方程反映了该材料在受压缩过程的压力与体积关系的变化, HJC 模型中, 混凝土状态方程分为 3 段, 分别为弹性段、过渡段和压实段。根据平板撞击实验结果, 重新确定 HJC 模型压实段参数  $p_L$ 、 $\mu_L$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 。

HJC 本构模型中, 为获得不含常数项的压力与体积应变的三次多项式关系, 压实段压力-体积应变( $p-\mu$ )关系修正为压力-压实的体积应变( $p-\bar{\mu}$ )关系。通过确定混凝土的压实密度:

$$\rho_g = \frac{\rho_0}{1 - \varphi_0} \tag{10}$$

引入混凝土压实状态的体积应变:

$$\mu_L = \frac{\rho_g}{\rho_0} - 1 \tag{11}$$

得到  $\mu$  与  $\bar{\mu}$  的变换关系:

$$\bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_L}{1 + \mu_L} \tag{12}$$

HJC 模型指出, 混凝土的压实密度  $\rho_g$  为混凝土空隙完全塌陷状态的密度, 其值的确定方法可依据混凝土孔隙率  $\varphi_0$  得出。

采用孔隙率计算 2 种强度混凝土压实密度分别为:

$$\rho_{g,C25} = \frac{\rho_{0,C25}}{1 - \varphi_{0,C25}} = 2\,577.33 \text{ kg/m}^3 \tag{13}$$

$$\rho_{g,C40} = \frac{\rho_{0,C40}}{1 - \varphi_{0,C40}} = 2\,583.07 \text{ kg/m}^3 \tag{14}$$

分别由 C25 和 C40 混凝土拟合的  $p-\mu$  关系与式 (10)~(14) 确定  $p-\bar{\mu}$  的三次多项式系数,  $p-\mu$  曲线与原始 HJC 模型过渡段直线交点分别确定 C25 和 C40 混凝土对应的  $p_L$  为 0.9 GPa 和 1.2 GPa。至此, HJC 模型中混凝土高压段状态方程参数确定完成, 见表 2。

表 2 混凝土 HJC 模型状态方程参数

Table 2 EOS parameters of the HJC model for concrete

混凝土	$K_1/\text{GPa}$	$K_2/\text{GPa}$	$K_3/\text{GPa}$	$p_L/\text{MPa}$	$\mu_L$
C25	56.34	-363.96	1689.50	0.9	0.171
C40	137.37	-971.90	3483.43	1.2	0.187

## 3 平板撞击实验数值模拟

基于 LS-DYNA 动力学有限元分析软件, 开展平板撞击实验数值模拟, 检验基于该实验标定的 HJC 模型状态方程参数的准确性, 并进一步探究高压下混凝土状态响应。

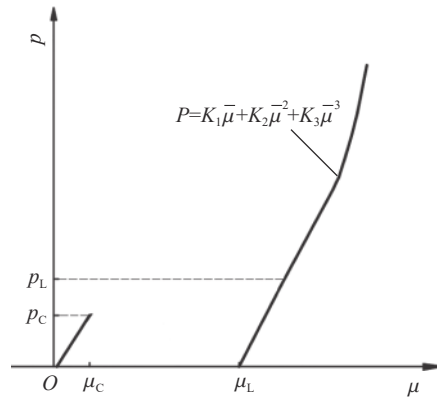


图 15 HJC 模型状态方程<sup>[2]</sup>  
Fig. 15 EOS of the HJC model

### 3.1 有限元模型与材料参数

平板撞击实验数值模拟采用 Lagrange 算法, 建立四分之一模型, 对称面设置对称边界, 按照实验试件及其安装构件实际尺寸建立。模型分为 3 个部分, 分别是混凝土飞片、TU1 无氧铜靶片和靶片固定装置, 各部件接触均为自动面-面接触。靶片固定装置边缘设置固定边界条件和非反射边界条件。设置 5 个观测点如图 16 所示,  $O$  点位于 TU1 无氧铜靶板中心, 记录  $O$  点速度变化, 在混凝土飞片轴线上, 从撞击界面开始, 间隔 3 mm, 分布有  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  等 4 个观测点, 记录 4 个位置点压力变化。

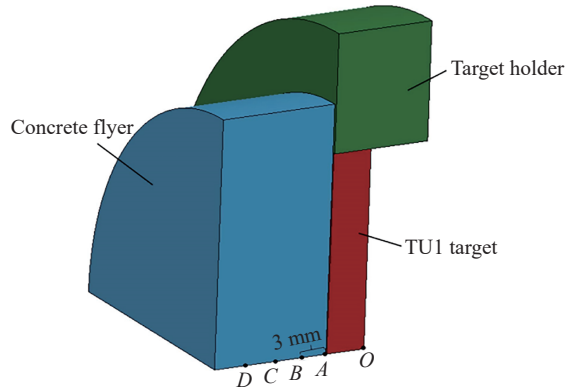


图 16 数值模拟模型

Fig. 16 Numerical simulation model

混凝土飞片材料模型为 HJC 模型, 除状态方程参数外, 其他参数按照 HJC 模型默认方法给出, 设置单元不失效, 主要材料参数见表 3。TU1 无氧铜靶片与铝制靶片固定结构均采用 Johnson-Cook 材料模型, 采用 Grüneisen 状态方程。

表 3 混凝土 HJC 模型主要参数

Table 3 Parameters of HJC model for concrete

混凝土	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$G/\text{GPa}$	$f_c/\text{MPa}$	$T/\text{MPa}$	$p_c/\text{MPa}$	$\mu_c/10^{-3}$
C25	2.202	9.517	26.5	3.19	8.83	0.696
C40	2.177	11.79	42.1	4.02	14.03	0.893

注:  $G$ 为剪切模量,  $f_c$ 为单轴抗压强度,  $T$ 为最大静水拉伸强度,  $p_c$ 为压碎压力,  $\mu_c$ 为压碎体积应变。

### 3.2 数值模拟结果与分析

提取  $O$  点对应单元的速度作为该点的粒子速度, 图 17 和图 18 分别为该点在 C25 和 C40 混凝土反向平板撞击实验数值模拟粒子速度与实验粒子速度对比。数值模拟结果在粒子速度走势、平台段脉宽和幅值等方面与实验吻合度较高, 说明数值模拟参数合理。对比同一发射速度下的前后两次粒子速度跳跃, 后者增大速度变缓, 反映了在 TU1 靶板中冲击波扰动由强扰动变为弱扰动。

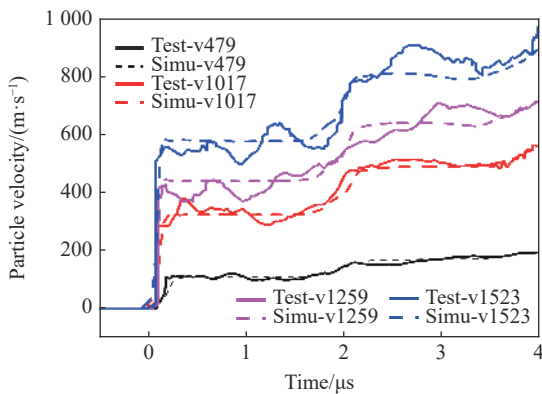


图 17 C25 混凝土粒子速度数值模拟与实验结果对比

Fig. 17 Comparison of simulation and test results for C25 concrete

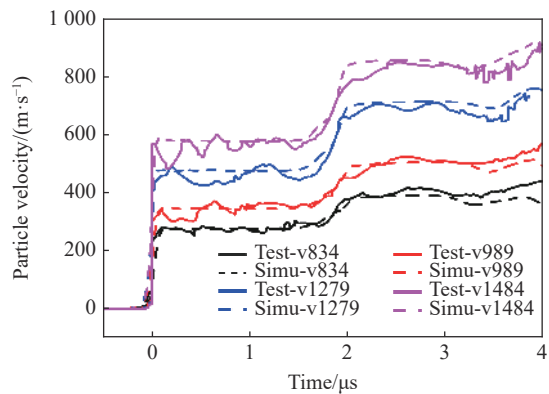


图 18 C40 混凝土粒子速度数值模拟与实验结果对比

Fig. 18 Comparison of simulation and test results for C40 concrete

提取  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  点的压力曲线如图 19, 数值计算工况为 C25 混凝土飞片以 479 m/s 发射速度撞击靶板。飞片与 TU1 靶片发生碰撞后, 压缩波使得飞片中  $A$  点压力迅速升高, 压力波形震荡剧烈, 约 2.03  $\mu\text{s}$  后,



由 TU1 无氧铜自由面反射的拉伸波到达 *A* 点, 压力下降, 后经过多次拉伸波卸载, 最终压力卸载为零。在压缩波加载下, *A* 点首先出现压力的升高, 随后, *B*、*C*、*D* 依次升高。由于压缩波作用过后, 混凝土密实程度增大, 波的传导能力增强, 拉伸波将以更高的速度到达 *B*、*C*、*D* 点, 因此 *A* 点首个矩形压力脉冲宽度最大, *B*、*C*、*D* 依次变小。图 20 为混凝土飞片压力云图。

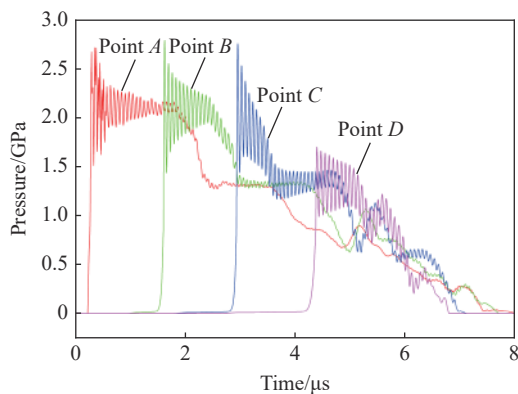


图 19 速度为 479 m/s C25 混凝土飞片压力时程曲线  
Fig. 19 Pressure-time curves of C25 flyer at 479 m/s

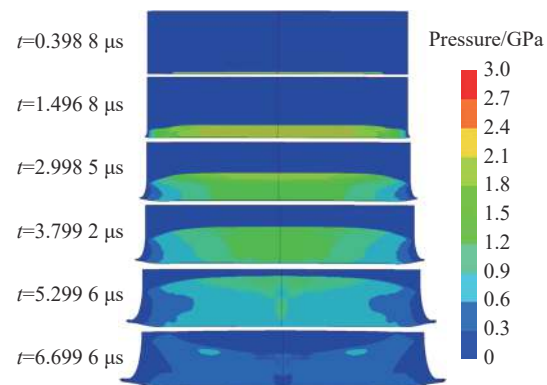


图 20 速度为 479 m/s C25 混凝土飞片压力云图  
Fig. 20 Pressure cloud in C25 concrete flyer at 479 m/s

对比图 19 和图 21 不同撞击速度各点压力变化, 较低的撞击速度下, 前驱压缩波波速慢, 靶板反射拉伸波追赶并造成前驱波压力卸载, 因此, 撞击速度为 479 m/s 的混凝土中压力峰值由 *A* 向 *D* 依次减小, *C*、*D* 两点峰值卸载尤为明显; 而当飞片发射速度较高, 混凝土前驱压缩波始终保持高于拉伸波的波速, 拉伸波未能造成前驱波压力降低。其他实验数值模拟中, 混凝土飞片中压力变化也呈现相似规律。

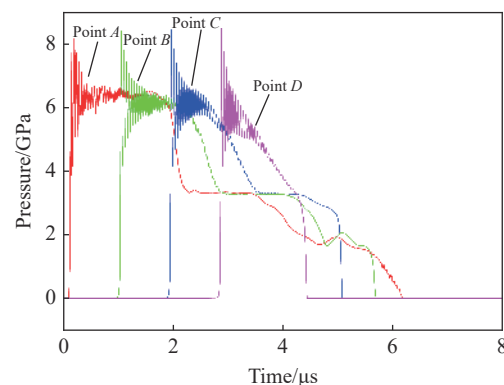


图 21 速度为 1017 m/s C25 混凝土飞片压力时程曲线  
Fig. 21 Pressure-time curve of C25 flyer at 1017 m/s

## 4 结 论

为探究高压下混凝土动态压缩特性, 明确强度对混凝土状态方程影响, 本文对 C25 和 C40 混凝土进行了一维应变动态力学行为的实验研究, 通过反向平板撞击实验, 获得了压力范围在 2~11 GPa 的冲击 Hugoniot 数据, 由实验数据拟合了混凝土材料波速与粒子速度 ( $u_s-u_p$ ) 关系, 进一步推导出用于构建混凝土高压状态方程的压力-密度 ( $p-\rho$ )、压力-体积应变 ( $p-\mu$ ) 数据, 并依据实验结果讨论了混凝土基体强度造成混凝土状态方程差异的作用机理。通过混凝土孔隙率计算了混凝土压实密度, 重新确定了两种强度混凝土 HJC 状态方程参数, 并通过反向平板撞击实验的数值模拟, 分析了混凝土在高静水压下冲击波传播特征, 主要结论如下:

(1) 实验结果表明, 混凝土材料在 2~11 GPa 的高静水压力作用下持续被压缩, 密度与体积应变随压力增大而增大, 造成这一现象的主要原因是混凝土孔隙塌陷。

(2) 对比 C25 和 C40 两种初始密度、孔隙率相近的混凝土实验结果, 发现两者压力-密度或体积应变数据分布趋势相同, 但不重合, 呈平行关系。同一静水压力下, 混凝土抗压强度越高, 基体孔隙越难塌陷, 体积应变就越小。但由于不同强度混凝土实验数据较少, 尚不能给出量化的混凝土抗压强度与其状

态方程的关系。

(3)平板撞击实验数值模拟结果显示,混凝土与TU1无氧铜靶片中均存在着复杂的冲击波反射与透射。当飞片低速撞击靶片时,由于前驱压缩波造成材料的压实,在后继拉伸波快速追赶卸载作用下,压力降低;而高速撞击条件下,前驱冲击波始终保持了高于后继拉伸波的波速,未能发生冲击波的追赶卸载作用。

### 参考文献:

- [1] 高飞,王明洋,张先锋,等.水泥砂浆的平板撞击实验与高压状态方程研究[J].*振动与冲击*,2018,37(12):41-47. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.12.007.  
GAO F, WANG M Y, ZHANG X F, et al. A study on planar impact and equation of state for cement mortar [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(12): 41-47. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.12.007.
- [2] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for concrete subjected to larger strains, high strain rates and high pressure [C] // The 14th International Symposium on Ballistics. Quebec, Canada: American Defense Preparedness Association, 1995: 591-600.
- [3] GRADY D E. Impact compression properties of concrete [C] // The 6th International Symposium on Interaction of Nonnuclearmunitions with Structures. Panama City, Florida, 1993:172-175.
- [4] GEBBEKEN N, GREULICH S, PIETZSCH A. Hugoniot properties for concrete determined by full-scale detonation experiments and flyer-plate-impact tests [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32(12): 2017-2031. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.08.003.
- [5] GEBBEKEN N, GREULICH S, PIETZSCH A. Equation of state data for concrete determined by full-scale experiments and flyer-plate-impact tests [C] // European Conference on Computational Mechanics. Cracow Poland, 2001.
- [6] RIEDEL W, WICKLEIN M, THOMA K. Shock properties of conventional and high strength concrete: experimental and mesomechanical analysis [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(3): 155-171. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2007.02.001.
- [7] RIEDEL W, THOMA K, HIERMAIER S. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes [C] // Proceedings of the 9th International Symposium on the Effects of Munitions with Structures. Berlin, 1999: 315-322
- [8] 王永刚,张远平,王礼立. C25混凝土冲击绝热关系和 Grüneisen 型状态方程的实验研究[J]. *物理学报*, 2008, 57(12): 7789-7793. DOI: 10.7498/aps.57.7789.  
WANG Y G, ZHANG Y P, WANG L L. Experimental study on the shock Hugoniot relationship and the Grüneisen-type equation of state for C25 concrete [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(12): 7789-7793. DOI: 10.7498/aps.57.7789.
- [9] GRADY D E. Shock equation of state properties of concrete[R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 1996. DOI: 10.2495/SUSI960371.
- [10] KIPP M E, CHHABILDAS L C, REINHART W D. Elastic shock response and spall strength of concrete[C]// AIP Conference. The tenth American Physical Society Topical Conference on Shock Compression of Condensed Matter. Amherst, Massachusetts, 1998: 557-560. DOI: 10.1063/1.55664.
- [11] HALL C A, CHHABILDAS L C, REINHART W D. Shock Hugoniot and release in concrete with different aggregate sizes from 3 to 23 GPa [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1999, 23(1): 341-351. DOI: 10.1016/S0734-743X(99)00085-8.
- [12] TSEMBELIS K, MILLETT J C F, PROUD W G, et al. The shock Hugoniot properties of cement paste up to 5GPa [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2000, 505(1): 1267-1270. DOI: 10.1063/1.1303692.
- [13] TSEMBELIS K, PROUD W G, WILLMOTT G R, et al. The shock Hugoniot properties of cement paste & mortar up to 18 GPa [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 706(1): 1488-1491. DOI: 10.1063/1.1780520.
- [14] 蒋国平,浣石,郝洪,等. 钢纤维高强混凝土材料的气体炮试验研究 [J]. *物理学报*, 2013(1): 351-356. DOI: CNKI:SUN:WLXB.0.2013-01-054.  
JIANG G P, HUAN S, HAO H, et al. Performance of steel reinforced high strength concrete investigated in the gas gun experiment [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013(1): 351-356. DOI: CNKI:SUN:WLXB.0.2013-01-054.
- [15] 马晓青. 冲击动力学 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992: 168-169.

(责任编辑 王易难)