DOI: 10.11883/bzycj-2017-0173 文章编号: 1001-1455(2018)04-0827-07

基于元件组合理论的砂岩动态损伤本构模型*

江雅勤[1],吴帅峰[2],刘殿书[1],贾 贝[1],王 蒙[1],李晓璐[1]
(1.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083;
2.中国水利水电科学研究院岩土工程研究所,北京 100044)

摘要: 采用分离式霍普金森压杆(SHPB)系统,对砂岩进行不同速度下的冲击试验,得到砂岩的应变率效应特征以及典型的动态本构曲线。该曲线分为近似线弹性阶段、塑性阶段、塑性增强阶段和正向卸载阶段。通过组合模型的方法,构建了砂岩含损伤的动态本构模型,借助 LS-DYNA 软件中的用户材料子程序 UMAT 接口实现对本构模型的二次开发,并对砂岩在冲击速度为 7.5、9.5、11.5 和 13.5 m/s 4 种情况下的 SHPB 动态冲击压缩试验进行模拟。结果表明:所构建的模型可以很好地描述砂岩的应变率效应和应力-应变曲线弹性段,并且动态峰值强度、最大应变均与试验结果一致,应变率、峰值强度、最大应变与试验结果的相对误差不超过 10%。所构建的砂岩动态本构模型能够准确地描述砂岩在冲击作用下的动态力学特性。

关键词: 岩石动力学;分离式霍普金森压杆;本构模型;损伤
中图分类号: O347.3 **国标学科代码**: 13015 **文献标志码**: A

在地下矿开采、大断面公路隧道、大型地下工程、高陡岩石边坡、深埋洞室等岩体工程中,常常遇到砂岩动力学问题。致密砂岩气是国际上开发规模最大的非常规天然气。中国致密砂岩气的储量丰富,具有广阔的发展前景,在天然气能源结构中的重要性日趋显著[1-2]。砂岩在钻井开采时承受着冲击荷载,要提高机械钻井速度和开发水平、降低开发成本,对砂岩的动态力学特性进行研究是十分必要的[3]。牛雷雷等[4]利用摆锤冲击加载分离式霍普金森压杆(split Hopkinson pressure bar, SHPB)装置,得出动态抗压强度与加载应变率具有正相关性的结论。朱晶晶[5]对砂岩进行冲击试验,结果表明在动态应力峰值附近,砂岩损伤发生变化,岩石内部裂纹进入发育阶段。石祥超等[6]基于三轴动态试验,给出了砂岩的 Johnson-Holmquist 模型参数,并借助 AUTODYN 软件模拟验证了参数的准确性。赵光明等[7]对砂岩和泥岩两种典型的软岩进行冲击试验,通过用损伤体代替非线性弹簧,修改了朱-王-唐模型,建立了用于软岩的动态本构模型。到目前为止,还未见能够全面反映砂岩动态力学特性的本构关系[8],因此构建砂岩的动态本构模型具有重要的实际意义。

本研究中利用 SHPB 对砂岩进行冲击压缩试验,根据试验结果,考虑应变率效应和损伤软化效应,结合元件组合理论,构建基于损伤的砂岩本构模型,并利用 LS-DYNA 软件二次开发平台对致密砂岩的损伤本构模型进行模拟验证。

1 动态力学性能实验研究

试验岩样取自四川省某采石场,材质均匀,性状为硅质砂岩。将岩样加工成直径为 50 mm、高 40 mm 的圆柱试件[9]。试件两端经精细打磨,不平整度控制在 0.02 mm 以内。试件制作完成后,逐一进行超声波测试,选取声速差在 5%以内的试件。采用中国矿业大学(北京)∅50 mm 的 SHPB 铝杆系统(入射杆长度为 0.4 m),进行 8 组不同应变率条件下的动态加载试验,每组不少于 3 个试件,共 34 次试验。图 1 为试件在不同冲击速度(v)下的破坏情况。图 2 为平均后的应力-应变曲线。图 3 显示了应变率($\dot{\varepsilon}$)大于 50 s^{-1}时砂岩的典型应力-应变曲线。

* **收稿日期**: 2017-05-16; **修回日期**: 2017-08-07
基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2010QL05);教育部博士点基金项目(20100023110001)
第一作者: 江雅勤(1990—),女,博士研究生; **通信作者**: 吴帅峰,52awu@163.com。

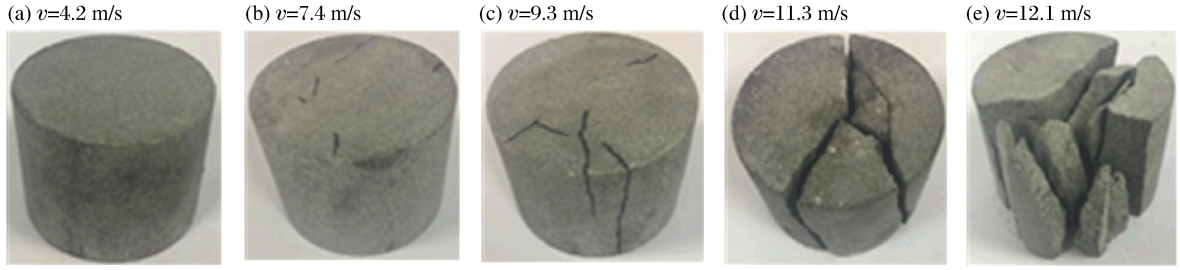


图 1 砂岩在不同冲击速度下的破坏形态

Fig. 1 Failure patterns of sandstone at different impact velocities

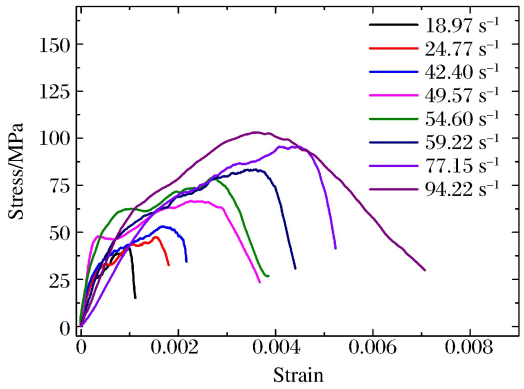


图 2 不同应变率下砂岩的本构曲线

Fig. 2 Stress-strain curves of sandstone at different strain rates

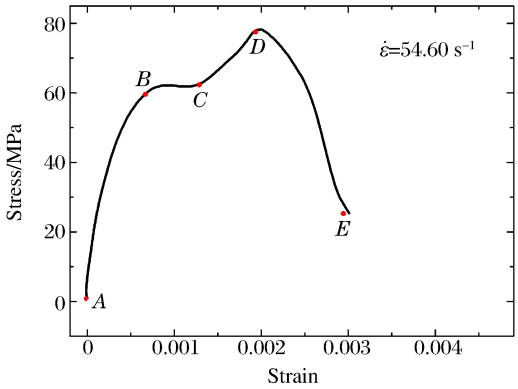


图 3 砂岩典型动态本构曲线

Fig. 3 Typical dynamic stress-strain curve of sandstone

从图 2 和图 3 可以看出，砂岩在冲击作用下具有如下特征。

(1) 弹塑性特征。在不同的中低应变率作用下，砂岩的本构曲线在达到峰值应力之前具有不同的特性。当应变率小于 50 s^{-1}时，砂岩的本构曲线在达到峰值应力前基本呈近似线弹性，部分试件表面有裂纹，但均未发生破碎。当应变率大于 50 s^{-1}时(见图 3)，达到峰值应力前的应力-应变曲线可分为 3 个阶段。第 1 阶段(AB 段)为近似线弹性段。第 2 阶段(BC 段)中，应力-应变曲线的斜率较小，应变增量较大，而应力增长缓慢，表明砂岩进入塑性阶段。在应力波作用下砂岩内部原始裂隙扩展，形成大量新裂隙，但还未形成宏观上的破坏。第 3 阶段(CD 段)是塑性增强阶段，斜率明显增大，但远小于 AB 段斜率，应力增加较快，逐渐达到应力峰值。当塑性应变较小时，试件裂纹继续发育，内部发生损伤，但未发生明显的宏观破坏；当应变达到某临界值时，试件发生破坏。达到峰值应力后(DE 段)，应变持续缓慢增加，而应力迅速下降，曲线为正卸载，未出现回弹现象，表明砂岩发生不可逆的变形损伤和破坏。

(2) 损伤特性。在岩石破坏的本构关系中引入损伤力学，通过损伤因子 D 反映岩石材料力学性能的弱化。通过前期在 800 mm 波长下进行不同冲击速度的加载试验，测试每个试件在冲击前后的声波波速变化，寻求损伤阈值。经过一系列试验，找到波速发生变化时所对应的试验情况：冲击速度约为 6.3 m/s，对应的应变率为 47 s^{-1}。因此，可以定义：砂岩受冲击后应变率大于 47 s^{-1}时产生损伤，小于 47 s^{-1}时不产生损伤[10]。根据砂岩动态力学参数与损伤的关系，可以确定砂岩损伤是应变和应变率的函数。在建立损伤与应变及应变率关系时，引入静态加载时的应变率 $\dot{\varepsilon}_0$，$\dot{\varepsilon}_0=10^{-4}$ s^{-1}，则：

$$D=\int_0^t(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)^{\alpha}\mathrm{d}x \tag{1}$$

式中：$\dot{\varepsilon}$ 为动态冲击加载时的应变率，α 为材料常数。求得含阈值的损伤表达式为：

$$D=\begin{cases}K_{\mathrm{D}}(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)^{\alpha}\varepsilon^{\beta} & \dot{\varepsilon}>47\ \mathrm{s}^{-1}\\ 0 & \dot{\varepsilon}\leqslant 47\ \mathrm{s}^{-1}\end{cases} \tag{2}$$

式中：K_D 为损伤待定系数，β 为材料常数。

(3) 黏性特征。砂岩的动态强度与应变率具有明显的相关性，即动态强度随着应变率的增大而增大。这种特征在本构模型中描述为黏性，在元件理论中用牛顿体表示：

$$\sigma=\eta\dot{\varepsilon} \tag{3}$$

式中：σ 为应力，η 为黏滞系数。

2　冲击作用下砂岩动态本构模型构建

通过引入损伤变量，采用元件组合方式，建立了由损伤体、Maxwell 模型和三参量模型并联组成的砂岩本构模型，如图 4 所示，其中 σ_1、ε_1 和 σ_2、ε_2 分别为 Maxwell 模型和三参量模型对应的应力和应变。砂岩的动态力学性能除表现出弹性和塑性外，还表现出与时间相关的黏性。Maxwell 模型由一个弹性元件(弹性模量 E_1、应力 σ_{11}、应变 ε_{11}、应力率 $\dot{\sigma}_{11}$)和一个黏壶元件(黏滞系数 η_1、应力 σ_{12}、应变 ε_{12}、应变率 $\dot{\varepsilon}_{12}$)串联而成，用于描述低应变率下的黏弹响应；三参量模型由一个弹性元件(弹性模量 E_{22}、应力 σ_{22}、应变 ε_{22})与一个黏壶元件(黏滞系数 η_2、应力 σ_{23}、应变 ε_{23}、应变率 $\dot{\varepsilon}_{23}$)并联再与一个弹性元件(弹性模量 E_{21}、应力 σ_{21}、应变 ε_{21})串联组成，用于描述中应变率的黏弹响应；损伤体(损伤因子 D)用于描述砂岩在冲击荷载作用下的损伤响应。

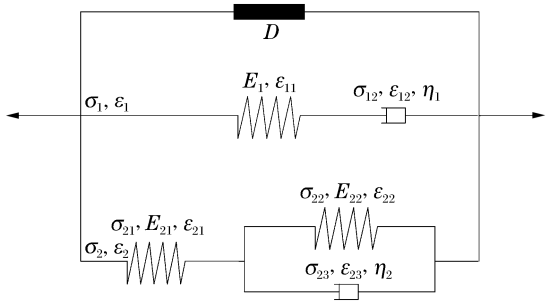


图 4　砂岩动态损伤本构模型

Fig. 4　Dynamic damage constitutive model for sandstone

对于三参量模型，根据串、并联元件基本规则，可得：

$$\sigma_2=\sigma_{21}=\sigma_{22}+\sigma_{23},\quad \varepsilon_{22}=\varepsilon_{23},\quad \varepsilon_2=\varepsilon_{21}+\varepsilon_{23} \tag{4}$$

其中：

$$\sigma_{21}=E_{21}\varepsilon_{21},\quad \sigma_{22}=E_{22}\varepsilon_{22},\quad \sigma_{23}=\eta_2\dot{\varepsilon}_{23} \tag{5}$$

由此可得：

$$\varepsilon_2=\frac{\sigma_{21}}{E_{21}}+\frac{\sigma_2-\eta_2\dot{\varepsilon}_{23}}{E_{22}} \tag{6}$$

由于

$$\sigma_2=\sigma_{21} \tag{7}$$

因此式(6)可化为：

$$\varepsilon_2=\frac{\sigma_2}{E_{21}}+\frac{\sigma_2-\eta_2\dot{\varepsilon}_{23}}{E_{22}} \tag{8}$$

$$\sigma_2=\frac{E_{21}E_{22}}{E_{21}+E_{22}}\varepsilon_2+\frac{\eta_2E_{21}}{E_{21}+E_{22}}\dot{\varepsilon}_{23} \tag{9}$$

其中：

$$\dot{\varepsilon}_{23}=\dot{\varepsilon}_2-\frac{\dot{\sigma}_{21}}{E_{21}} \tag{10}$$

式中：$\dot{\varepsilon}_2$ 为三参量模型的应变率。式(9)可化为

$$\dot{\varepsilon}_2=\frac{E_{21}+E_{22}}{\eta_2E_{21}}\left(\sigma_2+\frac{\eta_2}{E_{21}+E_{22}}\dot{\sigma}_2-\frac{E_{21}E_{22}}{E_{21}+E_{22}}\varepsilon_2\right) \tag{11}$$

式中：$\dot{\sigma}_2$ 为三参量模型的应力率。

采用拉普拉斯变换消去函数中的应力率项，使本构方程变为应变和应变率的函数。对式(11)进行拉普拉斯变换[11]，可得：

$$\mathrm{L}(\dot{\varepsilon}_2)=\frac{E_{21}+E_{22}}{\eta_2E_{21}}\left[\mathrm{L}(\sigma_2)+\frac{\eta_2}{E_{21}+E_{22}}\mathrm{L}(\dot{\sigma}_2)-\frac{E_{21}E_{22}}{E_{21}+E_{22}}\mathrm{L}(\varepsilon_2)\right] \tag{12}$$

$$\frac{\dot{\varepsilon}_2(t)}{s}=\frac{E_{21}+E_{22}}{\eta_2 E_{21}}F_{\sigma_2}(s)+\frac{sF_{\sigma_2}(s)-F_{\sigma_2}(0)}{E_{21}}-\frac{E_{22}}{\eta_2}\varepsilon_2(t) \tag{13}$$

式中：s 为复变参量。把边界条件 $\sigma_2(0)=0$ 代入式(13)，得到：

$$F_{\sigma_2}(s)=\frac{\eta_2 E_{21}}{s(E_{21}+E_{22}+s\eta_2)}\dot{\varepsilon}_2(t)+\frac{E_{21}E_{22}}{E_{21}+E_{22}+s\eta_2}\varepsilon_2(t) \tag{14}$$

对式(14)进行拉普拉斯逆变换，可得：

$$\mathrm{L}^{-1}(F_{\sigma_2}(s))=\mathrm{L}^{-1}\left(\frac{\eta_2 E_{21}}{s(E_{21}+E_{22}+s\eta_2)}\dot{\varepsilon}_2(t)\right)+\mathrm{L}^{-1}\left(\frac{E_{21}E_{22}}{E_{21}+E_{22}+s\eta_2}\varepsilon_2(t)\right) \tag{15}$$

$$\sigma_2=\left[\frac{E_{21}E_{22}}{E_{21}+E_{22}}\varepsilon_2(t)+\frac{\eta_2 E_{21}}{E_{21}+E_{22}}\dot{\varepsilon}_2(t)\right]\left[1-\exp\left(-\frac{E_{21}+E_{22}}{\eta_2}t\right)\right] \tag{16}$$

将式(16)化简整理得：

$$\sigma_2=[E_2\varepsilon_2(t)+\eta_2 E_3\dot{\varepsilon}_2(t)][1-\exp(-E_4 t/\eta_2)] \tag{17}$$

根据应变率定义，式(17)可化为：

$$\sigma_2=[E_2\varepsilon_2(t)+\eta_2 E_3\dot{\varepsilon}_2(t)]\left[1-\exp\left(-\frac{E_4}{\eta_2}\frac{\varepsilon_2(t)}{\dot{\varepsilon}_2(t)}\right)\right] \tag{18}$$

对于 Maxwell 模型，由串联得：

$$\sigma_1=\sigma_{11}=\sigma_{12},\quad \varepsilon_1=\varepsilon_{11}+\varepsilon_{12} \tag{19}$$

其中：

$$\varepsilon_{11}=\sigma_{11}/E_{11},\quad \dot{\varepsilon}_{12}=\sigma_{12}/\eta_1 \tag{20}$$

则

$$\dot{\varepsilon}_1=\frac{\dot{\sigma}_{11}}{E_{11}}+\frac{\sigma_{12}}{\eta_1} \tag{21}$$

式中：$\dot{\varepsilon}_1$ 为 Maxwell 模型的应变率。

对式(21)进行拉普拉斯变换，得：

$$\mathrm{L}(\dot{\varepsilon}_1(t))=\mathrm{L}\left(\frac{\dot{\sigma}_{11}}{E_{11}}(t)\right)+\mathrm{L}\left(\frac{\sigma_{12}}{\eta_1}(t)\right) \tag{22}$$

把式(19)代入式(22)，结合边界条件 $\varepsilon_1(0)=0$ 时，$\sigma_1(0)=0$，式(22)变换为：

$$F_{\sigma_1}(s)=\frac{E_{11}\dot{\varepsilon}_1(t)}{s(s+E_{11}/\eta_1)} \tag{23}$$

再由拉普拉斯逆变换，求得：

$$\sigma_1(t)=\eta_1\dot{\varepsilon}_1(t)\left[1-\exp\left(-\frac{E_{11}}{\eta_1}t\right)\right] \tag{24}$$

根据图 4 构建的含损伤的砂岩本构模型为：

$$\sigma=(1-D)\left\{\eta_1\dot{\varepsilon}(t)\left[1-\exp\left(-\frac{E_1}{\eta_1}\frac{\varepsilon(t)}{\dot{\varepsilon}(t)}\right)\right]+[E_2\varepsilon(t)+\eta_2 E_3\dot{\varepsilon}(t)]\left[1-\exp\left(-\frac{E_4}{\eta_2}\frac{\varepsilon(t)}{\dot{\varepsilon}(t)}\right)\right]\right\} \tag{25}$$

式中：E_1、E_2、E_3、E_4 为拟合参数。

3 SHPB 冲击砂岩模拟应用

LS-DYNA 是常用的显式非线性动力分析程序，以 Lagrange 算法为主，能够计算碰撞、爆炸、冲击等问题。运用 LS-DYNA 进行 SHPB 系统的模拟计算时，采用 Lagrange 中心差分算法，通过用户材料子程序 UMAT[12] 定义模型，通过定义失效关键字 * MAT_ADD_EROSION 实现单元失效[13]。自定义本构模型在 LS-DYNA 中的计算流程如图 5 所示，按上述方法编译程序，使用新生成的求解器提交 K 文件至求解器中求解。

按照试验设备建立直径为 50 mm 的 SHPB 系统模型，其中撞击杆、入射杆和透射杆长度分别为 400、2 000 和 2 000 mm，试件长度为 50 mm。系统杆密度为 2 800 kg/m^3，弹性模量为 77 GPa，泊松比为

0.27。对 7.5、9.5、11.5 和 13.5 m/s 4 种不同冲击速度(v)下的 SHPB 试验进行模拟，与对应的试验情况进行比较分析。

图 6 为 4 种冲击速度下砂岩试验和数值模拟得到的应力-应变曲线。从图 6 中可以看出：对于弹性极限及其对应的应变，试验曲线和模拟曲线具有较好的一致性；模拟曲线能够较好地描述弹性段结束时短暂的塑性段；在塑性段结束后，模拟曲线同样能准确地描述塑性强化段，具有与试验曲线较一致的峰值强度，所对应的峰值应变较试验曲线略小，而最大应变基本一致。模拟结果显示出与试验结果相同的应变率效应，砂岩的动态强度随着冲击速度的提高而提高。说明本研究中所构建的动态本构方程可以较全面地反映砂岩的动态本构关系，具有较好的模拟效果。

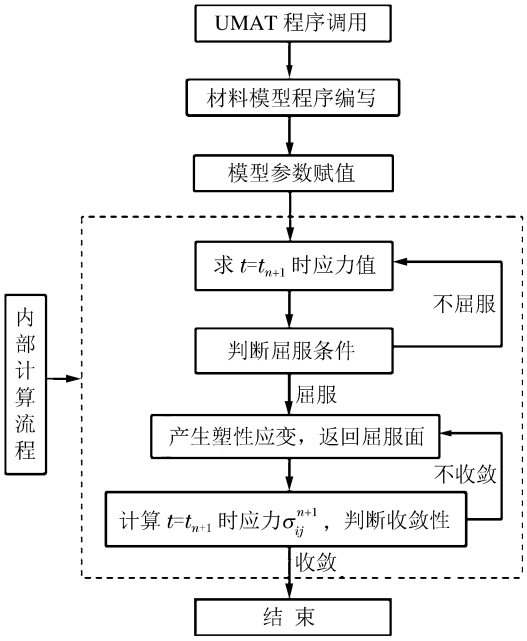


图 5 自定义本构模型在 LS-DYNA 中的计算流程

Fig. 5 Calculation flow of user-defined constitutive model in LS-DYNA

各冲击速度下砂岩动态力学特性的试验和模拟结果如表 1 所示。由表 1 可看出，模拟结果与试验结果相比，在相同冲击速度 v 下，试件的应变率 $\dot{\varepsilon}$、动态峰值强度 $\sigma_{d,max}$、最大应变(ε_{max})都较为接近，相对误差均在 10%以内，能够较好地表示砂岩在冲击作用下的动态力学特性，说明本研究中所构建的动态本构方程可以较准确地反映砂岩的动态力学特性。

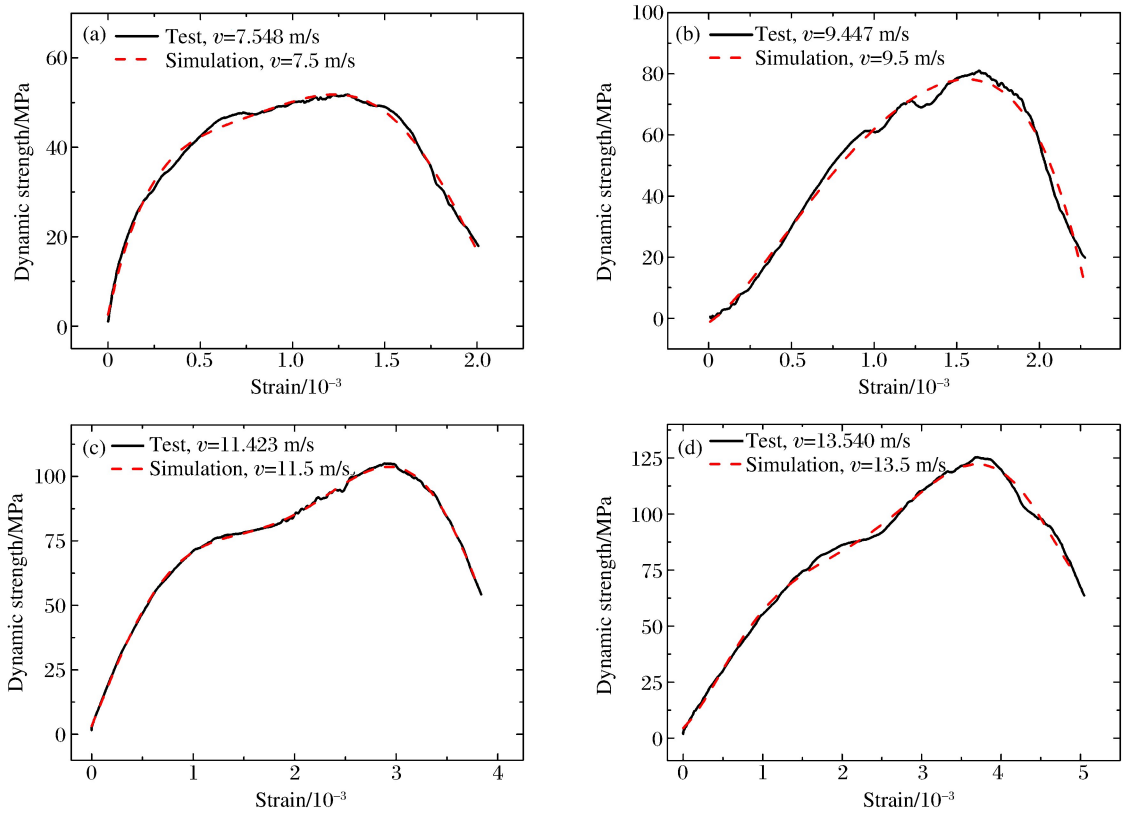


图 6 不同冲击速度下试验与数值模拟结果对比

Fig. 6 Comparison of tests and simulations at different impact velocities

表 1 砂岩动态力学特性的试验与模拟结果

Table 1 Tests and simulations of dynamic mechanical characteristics of sandstone

方法	$v/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$	$\dot{\varepsilon}/\mathrm{s}^{-1}$	$\sigma_{\mathrm{d,max}}/\mathrm{MPa}$	$\varepsilon_{\mathrm{max}}/10^{-3}$	方法	$v/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1})$	$\dot{\varepsilon}/\mathrm{s}^{-1}$	$\sigma_{\mathrm{d,max}}/\mathrm{MPa}$	$\varepsilon_{\mathrm{max}}/10^{-3}$
模拟	7.5	55.53	48.08	1.820	试验	7.5	52.39	50.93	2.000
模拟	9.5	64.06	63.18	2.170	试验	9.5	64.71	63.32	2.260
模拟	11.5	81.36	88.94	3.920	试验	11.5	78.23	95.87	3.900
模拟	13.5	85.25	97.14	6.080	试验	13.5	90.69	102.74	6.017

4 结 论

(1) 对砂岩进行了动态冲击试验，由砂岩的动态本构曲线可知：砂岩具有动态强度随应变率增大而增强的黏性特征，同时具有近似线弹性特征、理想塑性及塑性增强特征；损伤的发展与应变率相关，并由此建立了损伤与应变率及应变的函数关系。

(2) 根据砂岩的动态力学特征，采用元件组合理论，构建了由损伤体、Maxwell 模型和三参量模型组合而成的含损伤的砂岩本构模型。

(3) 利用 LS-DYNA 对所构建的本构模型进行内嵌编译，并对砂岩进行冲击试验模拟。结果显示，模型所得的应力-应变曲线弹性段、动态峰值强度及最大应变均与试验情况一致，且相对误差小于 10%，表明该模型可以较全面、准确地反映砂岩的动态本构关系。

参考文献：

[1] 魏国齐，张福东，李君，等. 中国致密砂岩气成藏理论进展[J]. 天然气地球科学，2016，27(2)：199-210.
WEI Guoqi, ZHANG Fudong, LI Jun, et al. New progress of tight sand gas accumulation theory and favorable exploration zones in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2016,27(2):199-210.

[2] 郭迎春，庞雄奇，陈冬霞，等. 致密砂岩气成藏研究进展及值得关注的几个问题[J]. 石油与天然气地质，2013，34(6)：717-724.
GUO Yingchun, PANG Xiongqi, CHEN Dongxia, et al. Progress of research on hydrocarbon accumulation of tight sand gas and several issues for concerns[J]. Oil & Gas Geology, 2013,34(6):717-724.

[3] 蔡灿，伍开松，袁晓红，等. 中低应变率下的岩石损伤本构模型研究[J]. 岩土力学，2015，36(3)：795-803.
CAI Can, WU Kaisong, YUAN Xiaohong, et al. Damage constitutive model of rock under medium and low strain rates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015,36(3):795-803.

[4] 牛雷雷，朱万成，李少华，等. 摆锤冲击加载下砂岩中应变率动力特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2014，33(12)：2443-2450.
NIU Leilei, ZHU Wancheng, LI Shaohua, et al. Experimental study of dynamic characteristics of sandstone under intermediate strain rate by using pendulum hammer driven "SHPB" apparatus[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014,33(12):2443-2450.

[5] 朱晶晶. 循环冲击载荷下岩石力学特性与损伤模型的试验研究[D]. 长沙：中南大学，2012.

[6] 石祥超，陶祖文，孟英峰，等. 致密砂岩 Johnson-Holmquist 损伤本构模型参数求取及验证[J]. 岩石力学与工程学报，2015，34(增刊 2)：3750-3758.
SHI Xiangchao, TAO Zuwen, MENG Yingfeng, et al. Calculation and verification for Johnson-Holmquist constitutive model parameters of tight sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015,34(Suppl 2):3750-3758.

[7] 赵光明，谢理想，孟祥瑞. 软岩的动态力学本构模型[J]. 爆炸与冲击，2013，33(2)：126-132.
ZHAO Guangming, XIE Lixiang, MENG Xiangrui. A constitutive model for soft rock under impact load[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(2):126-132.

[8] 李夕兵，左宇军，马春德. 中应变率下动静组合加载岩石的本构模型[J]. 岩石力学与工程学报，2006，25(5)：865-874.

LI Xibing, ZUO Yujun, MA Chunde. Constitutive model of rock under coupled static-dynamic loading with intermediate strain rate[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006,25(5):865-874.

[9] 梁书锋，吴帅峰，李胜林，等. 岩石材料 SHPB 实验试件尺寸确定的研究[J]. 工程爆破，2015,21(5):1-5.
LIANG Shufeng, WU Shuaifeng, LI Shenglin, et al. Study on the determination of specimen size in SHPB experiments of rock materials[J]. Engineering Blasting, 2015,21(5):1-5.

[10] 吴帅峰. 冲击荷载下砂岩损伤演化模型研究[D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2017.

[11] 魏明彬. 拉普拉斯变换的作用及意义[J]. 成都师范学院学报，2013,29(1):101-105.
WEI Mingbin. Function and meaning of Laplace transform[J]. Journal of Chengdu Normal University, 2013, 29(1):101-105.

[12] HALLQUIST J O. LS-DYNA key-word user's manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.

[13] 张安康，陈士海. LS-DYNA 用户自定义材料模型开发与验证[J]. 计算机应用与软件，2011,28(4):71-73.
ZHANG Ankang, CHEN Shihai. Exploiting and verifying user-defined material model in LS-DYNA[J]. Computer Applications and Software, 2011,28(4):71-73.

Dynamic damage constitutive model of sandstone based on component combination theory

JIANG Yaqin[1], WU Shuaifeng[2], LIU Dianshu[1],
JIA Bei[1], WANG Meng[1], LI Xiaolu[1]

(1. *School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing* 100083, *China*;
2. *Department of Geotechnical Engineering, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100044, *China*)

Abstract: In this study, using a split Hopkinson pressure bar (SHPB) system, we conducted the impact tests of sandstone at different impact velocities to collect the characteristics of the strain rate effect and obtained the typical dynamic constitutive curve of sandstone. The curve can be divided into an approximately linear elastic stage, a plastic stage, a plastic enhancement stage and a forward unloading stage. We constructed the dynamic damage constitutive model of sandstone adopting the combination model, and utilized the user subroutine UMAT interface of LS-DYNA to achieve the secondary development of the constitutive model, which was then used to simulate the SHPB dynamic impact compression tests of sandstone at four impact rates of 7.5, 9.5, 11.5 and 13.5 m/s. The calculation results showed that the as-constructed model gave a good description of the effect of the strain rate and the elastic stage of the stress-strain curve of sandstone. Moreover, the dynamic peak strength and maximum strain were in good agreement with the test results, and the relative errors of the strain rate, peak strength, maximum strain were less than 10%, thus indicating that the as-constructed dynamic constitutive model can accurately describe the dynamic mechanical properties of sandstone under impact.

Keywords: rock dynamic mechanics; split Hopkinson pressure bar; constitutive model; damage

(责任编辑　王　影)