

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.007

## 冲击荷载作用下灰砂岩破坏过程及损伤数值模拟研究\*

张明涛<sup>1a,2</sup>, 王 伟<sup>1b,2</sup>, 张思怡<sup>1c</sup>, 刘亚男<sup>1d,2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 a. 国防交通研究所; b. 土木工程学院; c. 建筑与艺术学院; d. 交通运输学院, 石家庄 050043;  
2. 河北省金属矿山安全高效开采技术创新中心, 石家庄 050043)

**摘 要:** 为了定量表征灰砂岩在应力波作用下的损伤程度和直观的展现其破坏过程, 利用 LS-DYNA 软件, 采用 HJC 动态本构模型, 对灰砂岩进行 SHPB 动态冲击数值模拟, 根据灰砂岩的 SHPB 实验结果验证了模拟方法的准确性, 采用微裂纹密度法来定义损伤变量  $D$ , 对不同冲击速度 (8 m/s、12 m/s、16 m/s、20 m/s)、不同轴压 (0 MPa、17.66 MPa、35.32 MPa、52.98 MPa、70.64 MPa) 下灰砂岩的损伤规律及破坏过程进行了数值模拟研究。数值模拟结果直观的展现了灰砂岩动态破碎过程: 在无轴压作用下, 灰砂岩破坏主要是由拉应变引起的劈裂破坏, 在施加轴压作用下, 灰砂岩的破坏形式主要以压剪破坏为主, 两种破坏过程中岩石损伤都是由外向内延伸, 且损伤变量  $D$  随着冲击速度和轴压的增加呈递增趋势。在有无轴压作用下, 冲击速度由 8 m/s 增加到 20 m/s 过程中, 其损伤变量  $D$  分别增加约 0.168、0.249, 可以看出轴压限制了损伤变量  $D$  的增加程度。

**关键词:** SHPB 实验数值模拟; 灰砂岩; 动静组合加载; 破坏过程; 损伤演化

中图分类号: TU45 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)01-0050-09

## Numerical Simulation of Failure Process and Damage of Gray Sandstone under Impact Loading

ZHANG Ming-tao<sup>1a,2</sup>, WANG Wei<sup>1b,2</sup>, ZHANG Si-yi<sup>1c</sup>, LIU Ya-nan<sup>1d,2</sup>

(1. a. National Defense Transportation Institute; b. School of Civil Engineering; c. School of Architecture and Art; d. School of Transportation, Shijiazhuang Railway University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Hebei Metal Mine Safety and Efficient Mining Technology Center, Shijiazhuang 050043, China)

**Abstract:** In order to quantitatively characterize the damage degree of gray sandstone under the action of stress wave and intuitively show its failure process, the SHPB dynamic impact on gray sandstone was simulated by a HJC dynamic constitutive model in the LS-DYNA software. According to experimental results, the accuracy of the simulation method was verified. Meanwhile, by defining the damage variable  $D$  according to the microcrack density method, the damage rule and failure process of gray sandstone under different impact speeds (8 m/s, 12 m/s, 16 m/s, 20 m/s) and different coaxial pressures (0 MPa, 17.66 MPa, 35.32 MPa, 52.98 MPa, 70.64 MPa) were studied. The numerical simulation result shows the dynamic crushing process intuitively. In the absence of axial compression, the fracture failure of gray sandstone is mainly caused by tensile strain. However, under the action of axial compression, the fracture failure is mainly compression shear failure. In both failure processes, rock damage extends from the outside to the inside, and damage variable  $D$  increases with the increase of impact velocity and axial compression. When the impact velocity increased from 8 m/s to 20 m/s with or without axial compression, the damage variable  $D$  increased by about 0.168 and 0.249, respectively. It can be seen that the axial compression limited the increase degree of damage variable  $D$ .

**Key words:** SHPB experimental numerical simulation; gray sandstone; coupled static and dynamic loads; destruction process; damage evolution

目前,随着社会经济的快速发展和资源利用量越来越大,地下空间开发、地下资源开采越来越趋向于深部,深部岩石由于受地应力作用,在受到扰动后表现出与浅部岩石不同的破坏形态和损伤程度,冲击损伤后的岩石和完整岩石的动力学特性也存在较大差异<sup>[1,2]</sup>。针对我国现阶段众多砂岩铀资源地浸开采面临的铀储层“低渗透”关键难题,对其灰砂岩的动态破坏过程及损伤规律的研究是非常有必要的<sup>[3]</sup>。

理论分析、实验研究和数值模拟等研究手段相结合是目前许多学科发展的趋势,数值模拟在 SHPB 实验技术的改进和材料动态力学性能研究中起着重要的作用<sup>[4]</sup>。对于 SHPB 实验,数值模拟技术不仅可以捕捉到微秒级实验过程中岩石的内部变形及破坏形态,而且还可以避免实验中端面摩擦效应、试件平行度公差、电磁干扰等因素的影响,提高了测试精度。近年来国内外学者对于岩石动态破坏及损伤的研究越来越多,实验研究大多数集中在对岩石的动态力学特性的研究和 CT 扫描技术观察岩石的损伤情况,数值模拟研究大多集中在对混凝土及岩石的力学特性及破碎过程的研究。李夕兵,宫凤强等利用 SHPB 实验对砂岩在一维动静组合下的动态力学特性及破坏状态进行了研究<sup>[5,6]</sup>;Morris 等采用 FEM-DEM 数值模拟方法分析了地质材料在爆炸和冲击作用下的力学响应<sup>[7]</sup>;李竞艳,高文学等利用 ABAQUS 软件建立细观有限元模型,由 Weibull 分布表征岩石材料性能的非均匀性,对动态拉伸载荷下岩石材料泛形裂纹扩展进行研究<sup>[8]</sup>;孙善飞利用 LS-DYNA 软件采用 HJC 模型模拟了混凝土的破坏过程,讨论了混凝土破坏机理及破坏形态<sup>[4]</sup>。上述研究成果集中在对岩石或混凝土的动态力学特性、破碎过程及状态进行研究,而采用损伤变量定量的表征在不同冲击速度及轴压作用下岩石的破坏程度以及有无轴压状态下岩石破碎过程的数值模拟研究还未见报道。因此,采用 LS-DYNA 软件对灰砂岩在冲击荷载作用下的破坏及损伤演化规律的研究非常有必要,研究结果对于理解岩石材料动态损伤演化及破坏过程有一定的补充意义,可更

好的促进爆破增渗技术在实际工程应用中的发展。

## 1 基本参数的确定

### 1.1 灰砂岩的基本参数的确定

数值模拟中灰砂岩基本物理力学参数的测定在石家庄铁道大学工程力学实验室进行。参数测定试验中用到的灰砂岩试件直径均为 50 mm,其中长度为 100 mm 的试件用于单轴抗压强度实验,长度为 25 mm 的试件用于巴西劈裂实验和 SHPB 动态冲击试验,以获得其灰砂岩的单轴压缩应力-应变曲线、单轴抗压强度 $f_c$ 、抗拉强度 $T$ ,进而通过公式 $E = \frac{\sigma}{\varepsilon_1}$ 、 $\nu = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ 、 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ 、 $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ 求得灰砂岩的弹性模量 $E$ 、泊松比 $\nu$ 、剪切模量 $G$ 与体积模量 $K$ ,其不同尺寸灰砂岩试样如图 1。上述公式中, $\sigma$ 为灰砂岩在弹性范围内的应力; $\varepsilon_1$ 为灰砂岩在弹性范围内应力为 $\sigma$ 时对应的轴向应变值; $\varepsilon_2$ 为灰砂岩在弹性范围内轴向应变为 $\varepsilon_1$ 时对应的径向应变值,利用引伸计得到<sup>[9]</sup>。灰砂岩基本物理参数如下表 1。

表 1 灰砂岩基本物理力学参数

Table 1 Basic physical and mechanical parameters of gray sandstone

$\rho/$ (kg/ m <sup>3</sup> )	$f_c/$ (MPa)	$T/$ (MPa)	$E/$ (GPa)	$\nu$	$G/$ (GPa)	$K/$ (GPa)
2416	88.3	8.7	12.9	0.25	5.16	8.6



图 1 灰砂岩试样

Fig. 1 Gray sandstone sample

### 1.2 SHPB 实验仪器及基本参数

数值模拟中 SHPB 实验装置尺寸采用 1:1 模拟石家庄铁道大学工程力学实验室中的 SHPB 试验装置系统,图 2 和图 3 分别为其实物图和简图;子弹、入射杆、透射杆直径均为 50 mm,其长度分别为 300 mm、

收稿日期:2019-06-27

作者简介:张明涛(1994-),男,硕士研究生,从事岩石动态损伤规律研究,(E-mail)2868992828@qq.com。

通讯作者:王 伟(1978-),男,教授、博士生导师,主要从事铀矿资源开采与工程地质灾害防控的教学与研究, (E-mail)wangweiuu@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51979170);石家庄铁道大学研究生创新资助项目(YC2019079)

3000 mm、2 000 mm, 材质均为40 Cr合金钢, 密度为7810 kg/m<sup>3</sup>, 纵波波速为5410 m/s, 弹性模量为210 GPa, 泊松比为0.23。



图2 SHPB实验装置实物图

Fig. 2 Physical drawing of SHPB experimental device

## 2 SHPB实验数值模拟

### 2.1 HJC模型及参数确定

数值模拟中, 灰砂岩的本构模型采用Holmquist-Johnson-Cook (HJC)模型, HJC模型是目前

普遍认为比较适用于模拟岩石或混凝土的动态本构模型之一, 其充分考虑了材料在大应变、高应变率 and 高压下的特性, 符合SHPB冲击实验的条件。

HJC模型主要包括状态方程、屈服面方程、损伤演化方程三方面, 该模型共有21个参数, 根据LS-DYNA关键字手册, HJC模型中的参数大致分类如下。

物理参数:  $R_0$  (材料密度);

强度参数:  $F_c$  (单轴抗压强度)、 $G$  (剪切模量)、 $T$  (抗拉强度)、 $A$  (特征化凝聚强度)、 $B$  (特征化压力硬化因子)、 $C$  (应变率影响系数)、 $N$  (压力硬化指数)、 $SFMAX$  (特征化最大强度)、 $EPSO$  (参考应变率);

损伤参数:  $D_1$  (损伤常数)、 $D_2$  (损伤常数)、 $EFMIN$  (断裂前塑性应变量)、 $FS$  (失效类型);

压力参数:  $P_c$  (压溃压力)、 $U_c$  (破碎体积应变)、 $P_L$  (压实点压力)、 $U_L$  (压实点体积应变)、 $K_1$  (压力常数)、 $K_2$  (压力常数)、 $K_3$  (压力常数);

在21个参数中,  $R_0$ 、 $F_c$ 、 $G$ 、 $T$ 已在1.1中由简单的物理实验获得, 根据HJC模型定义有  $P_c = \frac{F_c}{3}$ 、

$U_c = \frac{P_c}{K}$ , 可计算出  $P_c$ 、 $U_c$ <sup>[10]</sup>。其余参数由于测试难度和成本原因将参考文献[9]中的HJC参数。灰砂岩的HJC模型具体参数值如下表2。

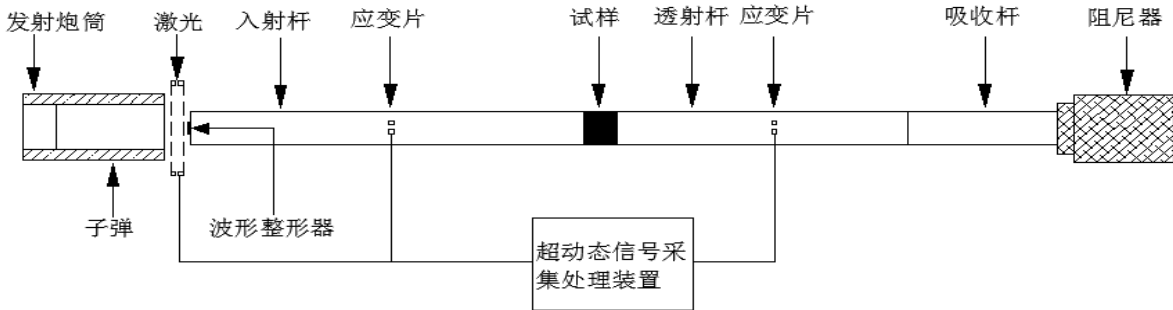


图3 SHPB实验装置简图

Fig. 3 Schematic diagram of SHPB experimental device

表2 灰砂岩HJC模型参数

Table 2 HJC model parameters for gray sandstone

$R_0$ /(kg·m <sup>-3</sup> )	$G$ /(GPa)	$A$	$B$	$C$	$N$	$F_c$ /(MPa)
2416	5.16	0.32	1.76	0.0127	0.79	88.3
$T$ /(MPa)	$EPSO$	$EFMIN$	$SFMAX$	$P_c$ /(MPa)	$U_c$	$P_L$ /(GPa)
8.7	1	0.00465	7.0	29.4	0.0034	0.8
$U_L$	$D_1$	$D_2$	$K_1$ /(GPa)	$K_2$ /(GPa)	$K_3$ /(GPa)	$FS$
0.08	0.013	1.0	81	-91	89	0.0

### 2.2 SHPB实验有限元模型的建立

有限元模型按照石家庄铁道大学工程力学实验室的

SHPB实验装置的实际尺寸建立三维有限元模型, 子弹、入射杆和透射杆均采用SOLID164实体单元, 材料选择

MAT\_ELASTIC 线弹性材料,灰砂岩同样采用 SOLID164 实体单元,材料选择 HJC 动态本构模型。数值模拟中采用单元失效的方法(关键字 MAT\_ADD\_EROSION)来模拟岩石的破裂,即在冲击压缩作用下岩石模型中细小单元的应变满足设定条件时自动删除,考虑到自然状态下岩石是由许多细小颗粒组成,因此在理论上该方法的模拟效果在很大程度上依赖于单元网格划分的粗细程度。为了更好的观察岩石的动态破碎过程,灰砂岩有限元模型网格划分相对于杆件要更加细化,权衡破碎效果和储存空间及计算时间,经过多次模拟分析比较,沿试件长度方向划分 20 份,沿圆截面周向划分 60 份时破碎效果和计算时间都达到了较好的状态,其岩石周围网格划分情况如图 4。

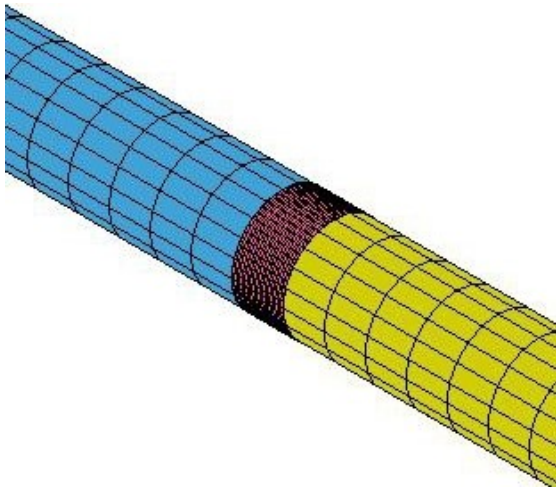


图 4 岩石周围网格划分图  
Fig. 4 Meshes around the rocks

为了保证试样中的应力平衡和变形均匀,以及实现常应变率加载,需要对入射波进行整形,其两个主要的技术方法为整形器技术和异性冲头整形技术。分别对两种整形方法进行数值模拟,有限元模型如图 5,波形整形效果如图 6,从图 6 中可以明显的看出纺锤形子弹相对于波形整形器得到的波形更加平滑,具有较长上升时间且上升前沿平缓,从而能够使试件处于良好的应力平衡状态。普通子弹及整形器的有限元模型共有 1680 个单元、2088 个节点;纺锤形子弹有限元模型共有 1314 个单元、1856 个节点,比整形器方法占用更少的内存空间,并且整形器技术中子弹、整形器、入射杆之间的接触也比单个纺锤形子弹繁琐。为了使应力波在杆件和灰砂岩之间更好的传播,子弹和杆件之间的接触方式采用 CONTACT\_AUTOMATIC\_SURFACE\_TO\_SURFACE,即面面自动接触,考虑到灰砂

岩试件在冲击压缩过程中的单元失效,岩石和杆件之间的接触采用 CONTACT\_EROSION\_SURFACE\_TO\_SURFACE,即侵蚀接触,侵蚀接触用于 1 个或 2 个表面的单元在接触时发生材料失效,接触依旧在剩余的单元中进行,它通常用于实体单元表面发生失效贯穿问题。

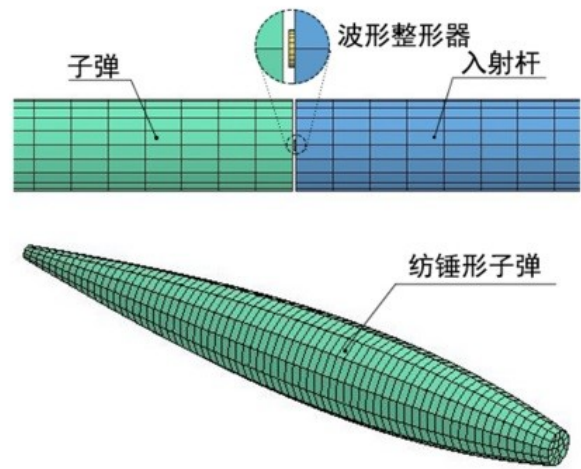


图 5 整形技术模型图  
Fig. 5 Plastic technology model diagram

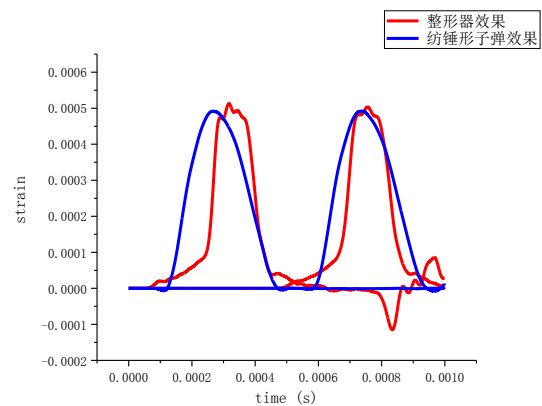


图 6 波形整形效果图  
Fig. 6 Waveform shaping effect diagram

### 2.3 一维轴压的加载及模拟实验方案

一维动静组合加载便是在岩石受动荷载冲击之前使岩石处于轴向预应力状态之下,其受力示意图如图 7。数值模拟中采用动态松弛法对其施加轴向预应力,在显示动态松弛法中是以模型的变形运动能量来判断动力松弛法是否收敛,通过关键字 DEFINE\_CURVE 定义预载荷曲线,定义稳定性匝道曲线加载到 100% 保持定值,直到收敛,通过关键字 CONTROL\_DYNAMIC\_RELAXATION 对相关条件进行控制,当符合设置条件时,动态松弛分析终止并自动转换到第二阶段的瞬态分析,稳态分析阶段

加载的预应力及变形会自动当成第二阶段的初始条件,其施加预应力轴压后的岩样如图8,为检查灰砂岩轴压的施加情况,取轴压为35.32 MPa的模拟实验结果,利用LS-PREPOST软件后处理功能在岩石端面沿直径方向均匀选择4个监测点,如图9,绘制出这些单元监测点的压力-时间历程曲线,如图10,同时由图10可以看出岩石轴压施加状态和端面应力均匀性较好。

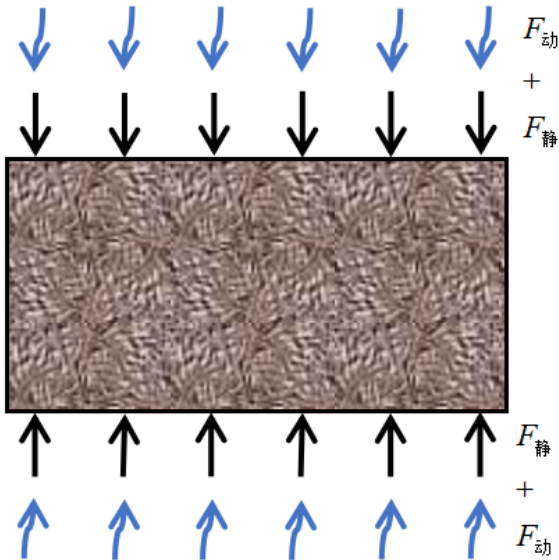


图7 动静组合受力示意图

Fig. 7 Dynamic and static combination force diagram

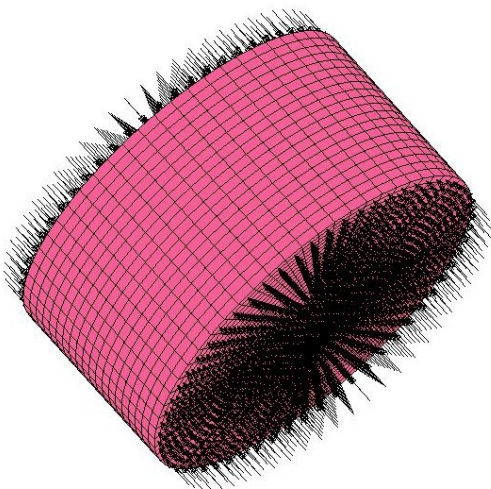


图8 施加预应力轴压图

Fig. 8 Apply prestressed axial compression diagram

模拟方案以灰砂岩单轴抗压强度 $f_c=88.3$  MPa的0%(无轴压)、20%、40%、60%、80%作为预应力轴压值施加在灰砂岩轴向两端,然后在每一轴压值下分别进行4次不同加载速度的动荷载对其灰砂岩进行冲击模拟实验,4次不同加载速度的动荷载对应的子弹速度分别为8 m/s、12 m/s、16 m/s、20 m/s,一

共20次模拟实验,用以考察冲击速度和轴压对灰砂岩损伤程度及破坏的影响。

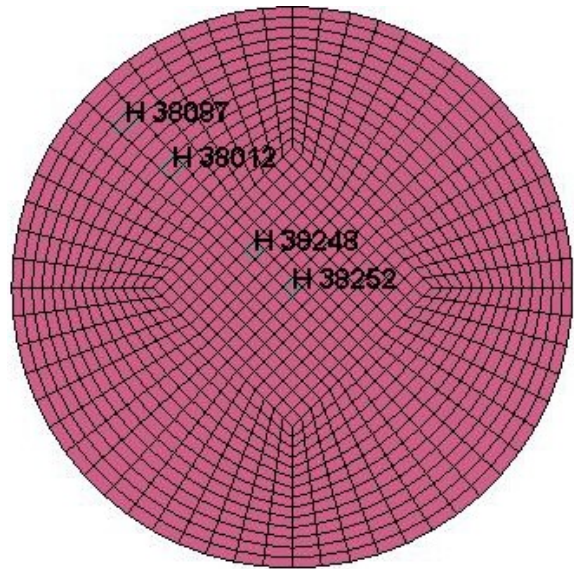


图9 应力监测点

Fig. 9 Stress monitoring point

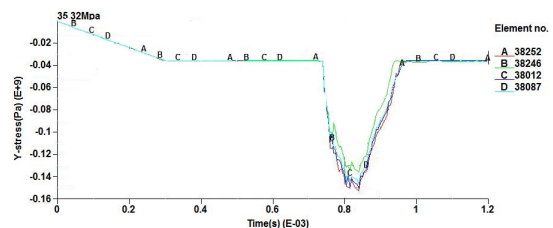


图10 应力-时间历程原始曲线图

Fig. 10 Initial stress-time diagram

### 3 模拟结果分析

#### 3.1 模拟结果与实验结果对比

为了验证本文数值模拟的准确性,利用SHPB实验装置对直径50 mm,长度25 mm的灰砂岩进行动态冲击实验,在实验前先对装置进行未加岩样的空杆冲击试验,其波形图如图11。由实验结果可知入射波、透射波的最大值分别为698.83 mv、658.95 mv,其误差为5.71%,小于10%,满足SHPB冲击实验的要求。将灰砂岩岩样两端面涂抹凡士林后夹在入射干和透射杆之间,如图12,通过激光测速仪可得子弹的撞击速度。图13为实验(子弹速度为8.57 m/s)和数值模拟(子弹速度为8 m/s)中的应变波形对比图,图14为其应力-应变曲线对比图,由曲线图显示数值模拟和实验所得应变波形图和应力-应变曲线图吻合的都较好,证明HJC动态模型的参数选择较合理。

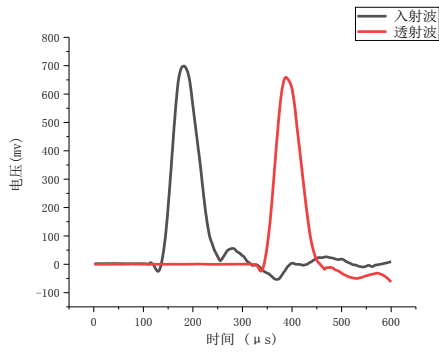


图 11 波形图

Fig. 11 Voltage waveform

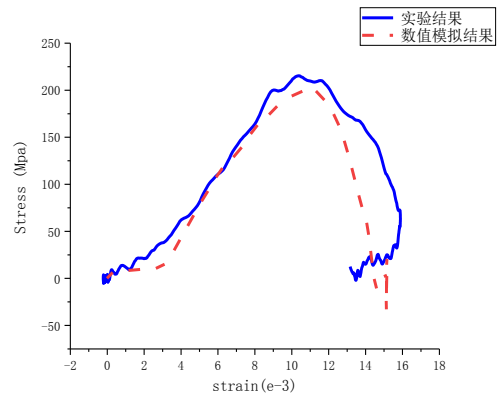


图 14 应力-应变曲线对比图

Fig. 14 Stress-strain curve comparison



图 12 岩样安装图

Fig. 12 Installation drawing of rock sample

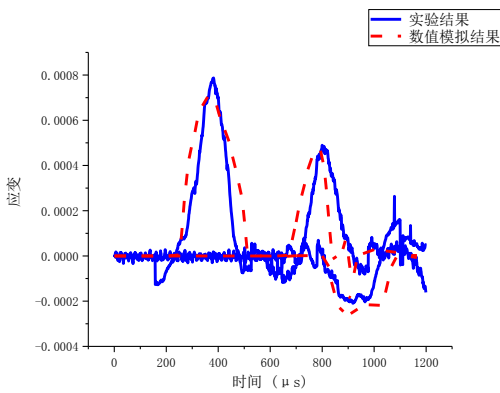


图 13 应变波形对比图

Fig. 13 Strain waveform comparison

图 15 为实验和数值模拟结果中岩石破碎状态对比图,图 15(a)、(b)是子弹冲击速度分别为 8.57 m/s、12.37m/s 情况下的岩石破碎状态,从两种冲击速度下岩石的破碎状态分析可知,岩石的破碎主要是由于岩石长度方向受到高速的冲击压缩导致岩石横向拉伸而破坏,并且破坏主要集中

在岩石外围,表现为岩石外表皮形成薄薄的大片块状的岩石脱落,在岩芯和外表皮之间的岩石出现长条形块状破碎,且岩石中间部分并未表现出较为明显的损伤,且随着冲击速度的增加中间未损伤部分的岩石变小,图 15(c)是数值模拟中子弹速度为 12 m/s 时对应的岩石破碎状态,由图可知岩石损伤同样集中发生在岩石外围,在外表面与岩芯之间的部分形成了块径大小不一的岩石碎块,且留芯现象较为明显,其破碎状态和实验中岩石的破碎状态符合度较高,证明本文数值模拟中岩石破碎状态可以很好的反应实验中岩石的破碎状态。

### 3.2 数值模拟岩石破坏形态及其过程

在数值模拟中岩石的破坏形式和过程得到了良好的展现,在其无轴压的动态冲击作用下,岩石的破坏主要以拉压破坏为主,破坏形式表现为劈裂破坏,外围形成长条形块状破碎,且出现留芯现象。以冲击速度为 12 m/s 的数值模拟结果为例,其破坏过程如图 16,在破坏初期损伤首先发生在岩石两端面的外围,如图 16(a),在高速冲击压缩过程中岩石长度方向被挤压变形,径向方向出现膨胀,在岩石横向拉应变的作用下,岩石外围侧面的中部开始出现短小的破裂缝,如图 16(b),随着横向变形的增大,短小的破裂缝平行于岩石长度方向扩展直至贯穿于整个岩石侧面,最终在岩石外围形成多条大小不一的裂纹,同时也可以看出岩石外围部分形成了长条形块状破碎,如图 16(d),此时岩样的岩芯还和外部岩石相连接,在高速冲击压缩作用下,裂缝继续增大且向岩石内部延伸,而后在岩芯和外围岩石之间产生裂缝直到岩石的岩芯和外围岩石分离,形成 1 块岩心和多块长条形外围碎块,如图 16(e),岩石整体破坏趋势由边缘向内部逐渐延伸。

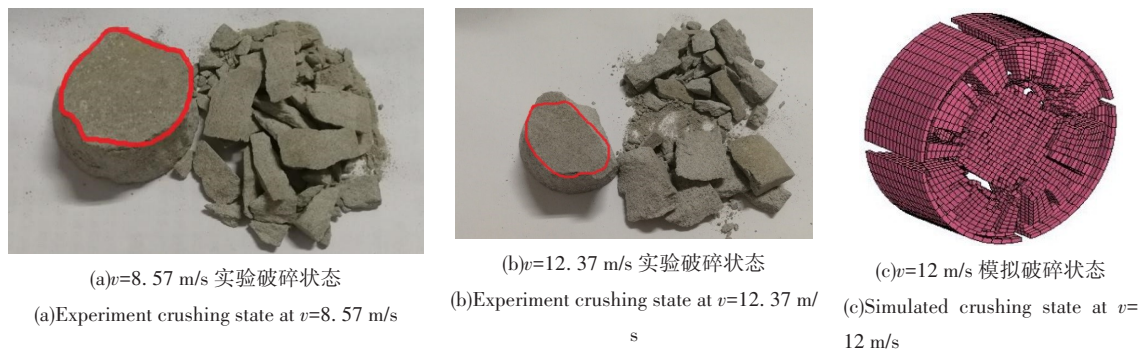


图 15 岩石破碎状态对比图  
Fig. 15 Comparison of rock fracture state

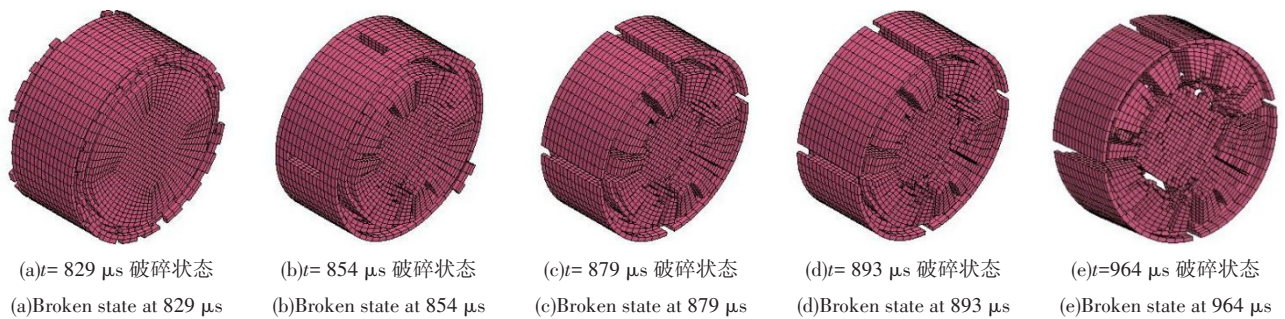


图 16 无轴压冲击下岩石破坏过程  
Fig. 16 Rock failure process under impact without axial compression

在轴压作用的动态冲击数值模拟下,岩石的破坏以压剪破坏为主,前期破坏以剪切破坏为主,后期破坏以压破坏为主,以轴压为 35.32 MPa,冲击速度为 12 m/s 的数值模拟实验结果为例,其破坏过程如图 17,在破坏初期同样表现出损伤首先发生在岩石两端面的外圈,如图 17(a),随后在岩石外围侧面形成倾斜于岩石长度方向(大致 45°)的剪切破裂

面,在压剪力的作用下倾斜破裂面在岩石外围继续扩展直至贯穿整个岩石的长度方向,如图 17(b),随后剪切破裂面两侧的破碎岩石块发生沿破裂面的相对滑动,岩石整体破坏趋势由边缘向内部延伸,直到岩石最后整体被压剪破裂失稳,形成块径大小不一的碎块,且表现为外围块径较大,没有出现留芯现象,如图 17(e)。

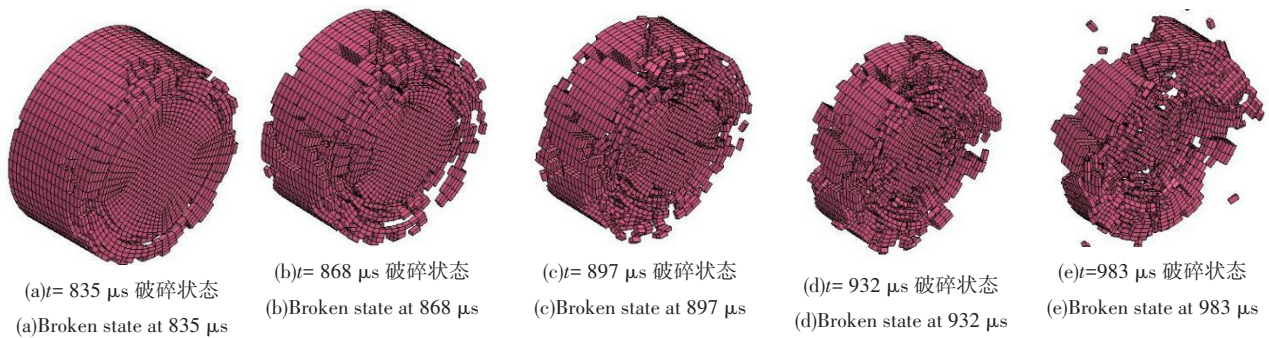


图 17 轴压冲击下岩石破坏过程  
Fig. 17 Rock failure process under axial impact

### 3.3 数值模拟损伤演化结果分析

自然界中的岩石是一种非均质脆性材料,其内部含有大量微小裂纹、空隙,在动荷载作用下岩石

会在短时间内经历原始裂隙的闭合以及新裂纹的产生、新旧裂纹开裂、扩展至各个裂纹的最终汇合等各种复杂的过程,要想定量的描述其破坏过程和

最终的破坏程度,我们就需要定义表征岩石破坏程度的损伤变量  $D$ 。损伤变量是表征结构内部劣化程度的量化参数,是研究岩石损伤过程和演化机制的前提和基础,现如今,常用的损伤定义方法有弹性模量法、能量耗散法、声波波速法、微裂纹密度法等,在本文数值模拟中采用微裂纹密度法,该方法将损伤定义为微裂纹体积在原始岩石总体积中所占的百分比,其公式如下

$$D = f = \frac{V}{V_0} \quad (5)$$

式中: $D$ 为损伤变量; $f$ 为微裂纹密度; $V_0$ 为原始岩石总体积; $V$ 为进行冲击试验之后微裂纹和空隙的总体积。

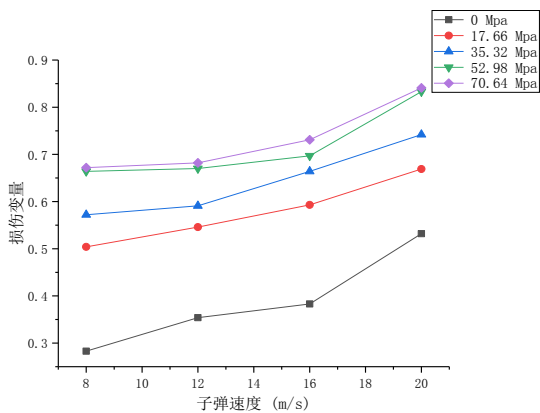


图 18 损伤变量曲线图

Fig. 18 Damage variable curve

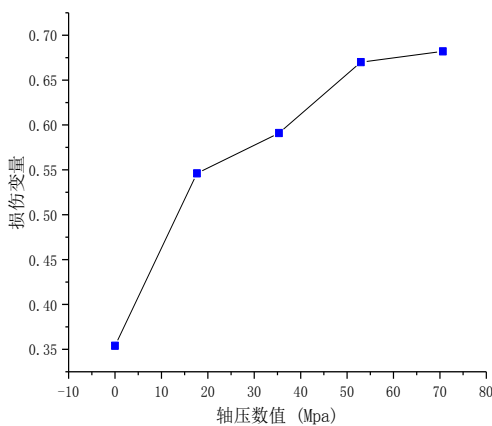


图 19 损伤变量随轴压变化曲线图

Fig. 19 Curve of damage variable changing with axial pressure

冲击前岩样的体积可以利用圆柱体体积计算公式得出,为  $4.91e^{-5} m^3$ ,数值模拟冲击破碎过程中和最终破碎岩石的体积可以由后处理软件 LS-PRE-POST 中 Measure 功能得出的岩样体积-时间历程曲

线而得到,因为该数值模拟中裂纹的产生是通过细小的单元失效而形成的,因此本数值模拟中岩样失效单元的体积变化量便可以很好的用来表达微裂纹和空隙体积的变化量。将不同情况下的体积变量带入公式(5)中得到各种冲击情况下岩石的损伤变量  $D$ ,其总体变化曲线如下图 18。从图中可以得出在不同轴压下岩石的损伤变量变化趋势基本一致,且随着子弹冲击速度的增加,岩石的损伤变量  $D$  呈递增趋势,这一结论和现阶段多数学者实验结论相一致。子弹冲击速度由 8 m/s 增加到 20 m/s 过程中,在无轴压状态下,岩石的损伤变量  $D$  的变化范围为 0.283 ~ 0.532,变化量为 0.249;在 17.66 MPa、35.32 MPa、52.98 MPa、70.64 MPa 四种轴压作用下,岩石的损伤变量  $D$  的变化范围分别为 0.504 ~ 0.669、0.572 ~ 0.742、0.664 ~ 0.833、0.672 ~ 0.841,变化量分别为 0.165、0.170、0.169、0.169,从中可以看出轴压的作用限制了损伤的发展程度。

从图 18 中可得出岩石的损伤变量随轴压的变化趋势同样大致相同,图 19 为子弹冲击速度为 12 m/s 时,岩石损伤变量随轴压的变化曲线图,从图中可以看出随着轴压数值的增加,岩石的损伤变量呈现出递增的趋势,该结论与现阶段实验研究结论稍有出入。现有的实验研究结论表明,岩石是一种多孔脆性材料,自然状态下其内部含有大量的微小空隙和裂纹,在施加轴压初期,随着轴压的增加,岩石内部初始空隙和裂纹会闭合,岩石密实性相应增加,从而导致岩石的弹性模量增加,抵抗冲击能力增强。当岩石内部初始空隙和裂纹完全闭合后,继续增加轴压将会使岩石在原有空隙和裂纹的基础上产生新的裂纹,在新生裂纹的影响下,岩石自身的弹性模量随之会降低,导致其抗冲击能力减弱,继续增加轴压,裂纹伸张、扩展最终汇合,最后在宏观结构上出现开裂直至破坏,此时岩石的稳定性骤减,既是很小的动荷载也会导致岩石大面积破碎,因此试验中岩石在施加轴压的动静组合加载下,岩石的损伤变量会随着轴压的增大出现先减小后增加的变化趋势<sup>[5,6]</sup>。数值模拟结果之所以与实际实验结果稍有出入,主要是由在数值模拟理想状况下有限元模型在静荷载作用下所表现出的内部变形所引起,HJC 动态模型模拟混凝土及岩石在大应变、高应变率和高压条件下的特性效果较为理想,但是在静压下所表现出的变形情况却和实验结果存在差异,在数值模拟中,有限元模型上施

加轴压后,岩石并没有表现出抗冲击能力增强的阶段,而是在施加轴压后增加了岩石的径向应变,以至于助力其后面的动荷载使岩石产生更严重的损伤,从而出现了数值模拟中随着轴压数值的增加,岩石的损伤变量呈现出单调递增的趋势。

## 4 结论

首先通过对比数值模拟和实验结果,验证了模拟方法的准确性,然后对灰砂岩进行不同冲击速度、不同轴压下的SHPB冲击实验数值模拟,对其破坏过程、损伤规律和损伤程度进行了研究,得出了如下结论:

(1)纺锤形子弹冲头相对于波形整形器不仅建模方便、节省存储空间,而且得到的半正弦应力波形效果更加理想,保证了试样处于良好的应力平衡状态;采用单元失效的方法(关键字MAT\_ADD\_EROSION),在适当加大网格划分密度的情况下可以很好的模拟岩石的破碎状况。

(2)利用动态松弛法可以实现岩石两端轴压预应力的加载,且加载曲线波形震荡较平稳,其模拟过程、结果和分析可以为岩石动静组合加载的数值模拟方法及本构模型的选择提供参考。

(3)数值模拟结果很好的展现了有无轴压两种冲击情况下岩石的破碎过程,其整体破坏趋势都是由边缘向内部延伸;无轴压情况下,岩石的破坏以劈裂破坏为主;轴压的作用下,岩石的破坏以压剪破坏为主。损伤变量 $D$ 随着冲击速度和轴压的增加呈递增趋势,子弹速度由8 m/s增加到20 m/s过程中,在无轴压下,损伤变量最大值为0.532,在轴压为70.64 MPa轴压作用下,损伤变量最大值可达0.841,且轴压会限制损伤变量的增加程度,有无轴压状态下的损伤变量 $D$ 的变化量分别约为0.168、0.249。

### 参考文献(References)

- [1] 古德生. 地下金属矿采矿科学技术的发展趋势[J]. 黄金, 2004, 25(1): 18-24.
- [2] GU De-sheng. Development trend of mining science and technology in underground metal mines [J]. Gold, 2004, 25(1): 18-24. (in Chinese)
- [3] 古德生, 李夕兵. 有色金属深井采矿研究现状与科学前沿[J]. 矿业研究与发展, 2003, 23(2): 1-5.
- [4] GU De-sheng, LI Xi-bing. Research status and scientific frontier of deep well mining of nonferrous metals[J]. Mining Research and Development, 2003, 23(2): 1-5. (in Chinese)
- [5] 阙为民, 王海峰, 田时丰, 等. 我国地浸采铀研究现状与发展[J]. 铀矿冶, 2005, 24(3): 113-117.
- [6] QUE Wei-min, WANG Hai-feng, TIAN Shi-feng, et al. Research status and development of in-situ leaching uranium in china [J]. Uranium Mining and Metallurgy, 2005, 24(3): 113-117. (in Chinese)
- [7] 孙善飞. 混凝土SHPB实验数值模拟[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [8] SUN Shan-fei. Numerical simulation of concrete SHPB experiment [D]. Hefei: University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [9] 宫凤强, 李夕兵, 刘希灵, 等. 一维动静组合加载下砂岩动力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2076-2085.
- [10] GONG Feng-qiang, LI Xi-bing, LIU Xi-ling, et al. Experiment study of dynamic characteristics of sandstone under one-dimensional coupled static and dynamic loads [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(10): 2076-2085. (in Chinese)
- [11] 李夕兵, 宫凤强, ZHAO J, 等. 一维动静组合加载下岩石冲击破坏试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 251-260.
- [12] LI Xi-bing, GONG Feng-qiang, ZHAO J, et al. Test study of impact failure of rock subjected to one-dimensional coupled static and dynamic loads[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 251-260. (in Chinese)
- [13] MORRIS J P, RUBIN M B. Simulations of fracture and fragmentation of geologic materials using combined FEM-DEM analysis [J]. Int J Impact Eng, 2006(33): 463-473.
- [14] 李竞艳, 高文学, 宋肖龙. 岩石材料动载下泛形裂纹扩展数值模拟[J]. 振动与冲击, 2018, 37(22): 88-91.
- [15] LI Jing-yan, GAO Wen-xue, SONG Xiao-long. Numerical simulation of extensive crack propagation in rock under dynamic load [J]. Vibration and Shock, 2018, 7(22): 88-91. (in Chinese)
- [16] 凌天龙, 吴帅峰, 刘殿书, 等. 砂岩Holmquist-Johnson-Cook模型参数确定[J]. 煤炭学报, 2018, 43(8): 2211-2216.
- [17] LING Tian-long, WU Shuai-feng, LIU Dian-shu, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook model parameters for sandstone [J]. Journal of Coal, 2018, 43(8): 2211-2216. (in Chinese)
- [18] HOLMQUIST J, JOHNSON G R. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures[C]/14th International Symposium on Ballistic. Quebec City, Canada, 1993: 593-600.

英文编辑: 陈东方