

DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.05.014

黄佑鹏, 王志亮, 毕程程. 岩石爆破损伤范围及损伤分布特征模拟分析[J]. 水利水运工程学报, 2018(5): 95-102. (HUANG Youpeng, WANG Zhiliang, BI Chengcheng. Simulation analysis of blast-induced damage scope and its distribution characteristics of rocks[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(5): 95-102. (in Chinese))

## 岩石爆破损伤范围及损伤分布特征模拟分析

黄佑鹏, 王志亮, 毕程程

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:** 为了研究岩石爆破损伤范围及损伤分布规律, 基于 LS-DYNA 软件, 采用 HJC (Holmquist-Johnson-Cook) 材料模型, 探究了石灰岩爆破损伤范围随径向不耦合系数  $K$  增大的变化关系, 接着对比分析了石灰岩、凝灰岩和花岗斑岩的爆破损伤分布规律, 并用 Logistic 函数模型对损伤演化过程进行表征。结果表明: HJC 模型在岩石爆破损伤模拟中具有很好的适用性; 随着不耦合系数的增大, 损伤半径与炮孔半径之比呈先快后慢的减小趋势; 不同岩石的爆破损伤均呈反“S”形曲线衰减, 但损伤分布特征存在一定差异性, 石灰岩和凝灰岩的压碎区范围较大, 与裂隙区界线清晰, 而花岗斑岩压碎区范围较小, 与裂隙区界线不明显。研究结果可为实际工程中爆破损伤的评估与控制提供一定参考。

**关 键 词:** 岩石; 单孔爆破; 损伤演化; HJC 模型; 数值模拟

**中图分类号:** TU45

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2018)05-0095-08

爆破开挖在隧道掘进和煤岩开采等诸多方面应用普遍, 具有快速高效的优点。炸药爆炸一般在极短时间内产生很高压力, 通过应力波和爆生气体综合作用使岩石发生破碎<sup>[1]</sup>。由于炸药性能、装药结构、介质性质、地质条件等因素的复杂性, 爆破效果可控性不高, 容易产生不利影响, 如爆炸波对预保留岩石的损伤效应会降低施工质量, 影响工程安全。因此, 为了合理分析和有效控制岩石动态损伤, 必须对岩石爆破问题进行深入研究。

岩石爆破损伤指的是爆炸荷载作用下岩石的破坏效应, 即岩石的压碎和开裂。通常采用变量  $D$  来描述损伤程度,  $D=1$  表示岩石完全压碎,  $D=0$  表示岩石完整。岩石爆破中, 一般根据岩石破坏程度, 以炮孔为中心由近及远依次分为压碎区、裂隙区和弹性震动区<sup>[1]</sup>, 而工程中重点关注的是压碎区和裂隙区。迄今, 国内外研究人员均对爆破损伤开展了大量研究: 左双英等<sup>[2]</sup>通过模拟隧道爆破开挖, 探讨了爆破诱发的质点振动衰减特征及围岩损伤分布规律, 并预估岩体开裂深度和爆破损伤影响范围; 周燕等<sup>[3]</sup>对台阶爆破相邻炮孔间损伤范围进行模拟研究, 得出两孔间损伤百分比随孔距增大而减小随后趋于定值的结论; 胡英国等<sup>[4]</sup>通过自定义拉压损伤定量计算模型, 对溪洛渡高边坡保留岩体的爆破开挖损伤效应进行了数值模拟; 杨建华等<sup>[5]</sup>研究分析了隧洞开挖重复爆炸荷载作用下围岩的累计损伤特性; Yu 等<sup>[6]</sup>研究了钻爆法对砂岩的破坏效应, 指出砂岩的损伤程度随加载速率增加而增加; 戴俊<sup>[7]</sup>利用 Mises 强度准则, 并考虑岩石三向受力及其强度的应变率效应, 导出柱状药包爆炸岩石压碎圈与裂隙圈半径计算公式; Esen 等<sup>[8]</sup>基于压碎圈指数, 提出了压碎区范围的计算公式; Sim 等<sup>[9]</sup>通过裂纹扩展准则和气体质量守恒模拟岩石裂隙扩展, 并基于裂隙应力强度因子来确定裂隙扩展长度。就研究方法而言, 由于爆破试验成本较高、耗时长, 目前采用数值分析程序来模拟岩石的爆破损伤仍是一种简便高效的研究方法。

**收稿日期:** 2017-11-25

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51579062, 51379147)

**作者简介:** 黄佑鹏(1994—), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事岩石动力学研究。E-mail: 2909253712@qq.com

**通信作者:** 王志亮(E-mail: cviewzL@hfut.edu.cn)

在实际工程中,由于工况不同,爆破施工的岩石种类不一,因而岩石的破坏效果必然有所差异。例如,在进行光面爆破施工时,必须严格控制预保留岩体的破坏程度,尤其是炮孔附近岩体的局部损伤。为了合理预估和控制爆破效果以提高施工质量,就必须对不同岩石的爆破损伤加以区别对待。但在已有研究成果中,针对不同岩石爆破损伤分布特征差异性的研究尚不多见。本文基于 LS-DYNA 有限元软件和 HJC (Holmquist-Johnson-Cook) 本构模型,从损伤变量的角度对一种和多种岩石中单孔爆破进行模拟分析。首先,针对石灰岩材料,采用不耦合装药方式,探究爆破损伤范围随不耦合装药系数  $K$  增大的变化规律;其次,采用耦合装药方式,分别对石灰岩、凝灰岩和花岗斑岩 3 种岩石材料进行爆破损伤模拟,分析比较不同岩石爆破损伤的分布规律,力求得出对实际工程有参考价值的结论。

## 1 材料本构模型及数值建模

### 1.1 材料本构模型

**1.1.1 岩石材料** 爆破过程中炮孔附近岩石处于大应变、高应变率和高压力的状态,根据此特点,岩石模拟采用 HJC 模型<sup>[10]</sup>。该模型起初应用于混凝土材料,前人研究<sup>[11-12]</sup>表明其在岩石材料领域也具有很好的适用性。HJC 材料模型包括三部分:状态方程、屈服面方程和损伤演化方程。状态方程如图 1 所示,第 1 阶段为线弹性阶段;第 2 阶段为过渡阶段,表现为材料的孔洞逐渐压缩产生塑性变形;第 3 阶段为压密阶段,常用三次多项式表示,即  $p = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3$ ,  $\bar{\mu} = (\mu - \mu_1)/(1 + \mu_1)$ ,  $p_c$  和  $\mu_c$  分别为材料压垮时的静水压力和体积应变,  $p_1$  和  $\mu_1$  分别为材料压密时的静水压力和体积应变。

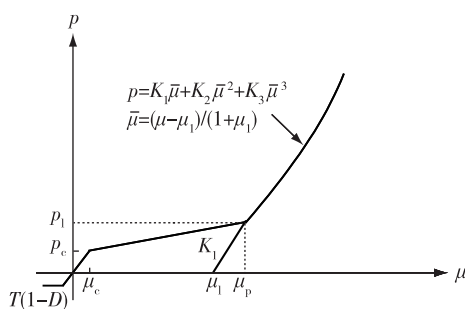


图 1 HJC 模型状态方程曲线

Fig. 1 Equation of state curve of HJC model

HJC 模型的屈服面方程为:

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}](1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (1)$$

式中:  $\sigma^*$  和  $P^*$  为特征化等效应力和特征化压力;  $\dot{\varepsilon}^*$  为特征化应变率;  $D$  为损伤度;  $A, B, N$  和  $C$  为材料强度参数。

HJC 模型用等效塑性应变和塑性体积应变的累计来描述材料损伤,其损伤演化方程为:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (2)$$

$$\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(P^* + T^*)^{D_2} \geq \varepsilon_{f, \min} \quad (3)$$

式中:  $\Delta \varepsilon_p$  和  $\Delta \mu_p$  表示 1 个计算循环内的等效塑性应变和塑性体积应变;  $\varepsilon_p^f + \mu_p^f$  表示常压下材料断裂时的塑性应变;  $T^*$  表示材料所能承受的最大特征化静水拉力;  $D_1, D_2$  为损伤常量;  $\varepsilon_{f, \min}$  为材料断裂时的最小塑性应变。损伤度  $D$  介于 0~1,  $D$  越大,表明材料受到损伤程度越大。石灰岩的 HJC 本构参数源于文献[11],详见表 1。

表 1 石灰岩 HJC 模型参数

Tab. 1 Parameters of HJC model for limestone

| $\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | $G / \text{MPa}$   | $f_c / \text{MPa}$ | $A$                | $B$     | $C$                | $N$                | $S_{\max}$         | $D_1$                           | $D_2$                   |
|--------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 2 300                                      | 10 093             | 60                 | 0.55               | 1.23    | 0.009 7            | 0.89               | 20                 | 0.04                            | 1                       |
| $T / \text{MPa}$                           | $p_c / \text{MPa}$ | $\mu_c$            | $p_1 / \text{MPa}$ | $\mu_1$ | $K_1 / \text{GPa}$ | $K_2 / \text{GPa}$ | $K_3 / \text{GPa}$ | $\varepsilon_0 / \text{s}^{-1}$ | $\varepsilon_{f, \min}$ |
| 4                                          | 20                 | 0.001 25           | 2 000              | 0.174   | 39                 | -223               | 550                | 1E-6                            | 0.01                    |

**1.1.2 炸药材料** 炸药采用 LS-DYNA 程序中内置的 \*MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 高性能炸药材料模

型和JWL状态方程,描述爆炸过程中爆炸产物的体积、压力以及能量特性,其表达式为:

$$P = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V}) \exp(-R_1 V) + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V}) \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E_0}{V} \quad (4)$$

式中: $P$ 为爆轰压力; $V$ 为相对体积; $E_0$ 为初始比内能; $A, B, R_1, R_2, \omega$ 为材料常数。选用2#岩石乳化炸药,各参数取为:密度 $\rho = 1\,150\text{ kg/m}^3$ ,爆速 $D = 3\,500\text{ m/s}$ , $A = 214.4\text{ GPa}$ , $B = 0.182\text{ GPa}$ , $R_1 = 4.2$ , $R_2 = 0.9$ , $\omega = 0.152$ , $E_0 = 4\,190\text{ MJ/m}^3$ , $V = 1.0$ 。

**1.1.3 空气材料** 空气采用空物质材料模型 \* MAT\_NULL,以线性多项式 \* EOS\_LINER\_POLYNOMIAL 表示其状态方程:

$$P = C_0 + C_1 V + C_2 V^2 + C_3 V^3 + (C_4 + C_5 V + C_6 V^2) E_0 \quad (5)$$

式中: $C_0 \sim C_6$ 为方程相关参数。其中, $C_4 = C_5 = 0.4$ , $E_0 = 2\,500\text{ MJ/m}^3$ , $V = 1.0$ ,余下参数均为0。

## 1.2 数值模型

对岩石单孔爆破进行数值模拟,设置不耦合装药和耦合装药两种方式。考虑到岩石、炸药和空气3种材料的相互作用,且为了避免网格畸变导致计算困难的问题,采用流固耦合算法,即岩石采用Lagrange算法,炸药和空气采用ALE算法。为减少计算量,根据对称性,建立1/4圆柱模型(图2)。岩石半径80 cm,高度100 cm,孔径根据不耦合系数调整;装药长度70 cm,半径3 cm;炮孔堵塞长度15 cm,且为简化模型,堵塞物和岩石采用相同材料;空气耦合区域半径15 cm。在圆柱面外侧和底面设置透射边界条件模拟无限域岩石介质,在对称面上施加法向位移约束。炸药起爆方式为整体同时起爆。

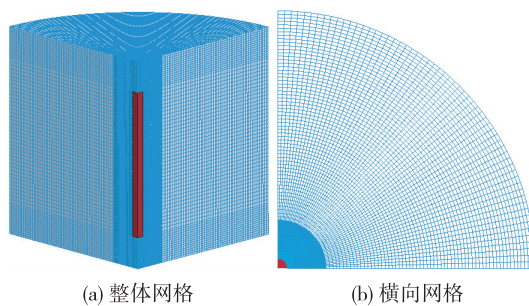


图2 数值计算模型

Fig. 2 Numerical calculation model

## 2 数值模拟结果与分析

### 2.1 不耦合装药下岩石爆破损伤范围

针对石灰岩材料,根据上述建模方法,分别采用不耦合装药系数 $K = 1.1 \sim 3.2$ 进行爆破损伤模拟。设定计算时间为1.0 ms(损伤演化已基本稳定<sup>[13]</sup>),时间步长取 $5.0\text{ }\mu\text{s}$ 。将模型镜像后形成整体模型,可得到炮孔中部岩石横向剖面的损伤分布情况。石灰岩损伤分布与不耦合系数的关系见图3。

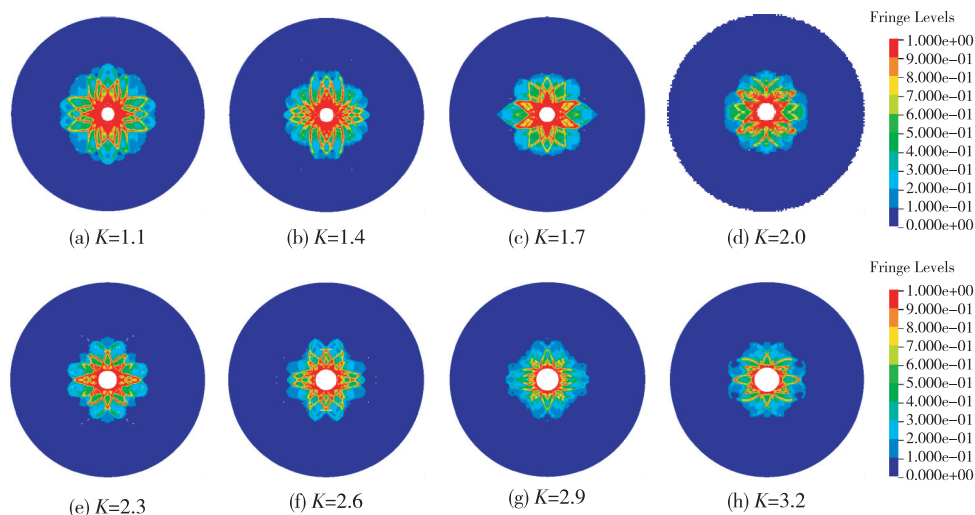


图3 石灰岩损伤分布与不耦合系数 $K$ 的关系( $t = 1\text{ ms}$ )

Fig. 3 Relationship between distribution of limestone damage and uncoupling coefficient  $K$  ( $t = 1\text{ ms}$ )

由图 3 可见,损伤  $D$  随炮心距增加均大致呈由大到小的分布规律,炮孔附近岩石完全损伤,即  $D=1$  (图 3 中红色区域)。损伤主要以放射状裂隙形式向外发展,随着不耦合系数  $K$  的增加,压碎区和裂隙区范围呈现逐渐减小趋势。

戴俊<sup>[7]</sup>基于爆炸荷载作用下岩石的破坏准则,提出柱状装药条件下炮孔四周压碎圈和裂隙圈半径的理论计算公式。耦合装药条件下,压碎圈半径为:

$$R_1 = \left( \frac{\rho_0 D^2 AB}{4\sqrt{2}\sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b \quad (6)$$

不耦合装药条件下,压碎圈半径为:

$$R_1 = \left( \frac{\rho_0 D^2 n K^{-2\gamma} l_e B}{8\sqrt{2}\sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} r_b \quad (7)$$

两种装药条件下,裂隙圈半径为:

$$R_2 = \left( \frac{\sigma_R B}{\sqrt{2}\sigma_{td}} \right)^{\frac{1}{\beta}} R_1 \quad (8)$$

式中:  $A = \frac{2\rho C_p}{\rho C_p + \rho_0 D}$ ,  $B = [(1+b)^2 + (1+b^2) - 2\mu_d(1-\mu_d)(1-b)^2]^{\frac{1}{2}}$ ;  $\alpha, \beta$  为耦合装药和不耦合装药时的荷载传播衰减指数;  $\rho, \rho_0$  为岩石和炸药密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $C_p, D$  为岩石中的声速和炸药爆速 ( $\text{km}/\text{s}$ );  $r_b$  为炮孔半径 ( $\text{m}$ );  $\mu_d$  为动泊松比;  $b$  为侧向应力系数;  $K$  为不耦合系数;  $n$  为爆炸产物膨胀碰撞孔壁时的压力增大系数,通常取 10;  $l_e$  为装药轴向系数,取 1;  $\gamma$  为爆轰产物的膨胀绝热系数,一般取 3;  $\sigma_{cd}, \sigma_{td}$  分别为岩石动态单轴抗压强度和动态单轴抗拉强度 ( $\text{MPa}$ );  $\sigma_R$  为压碎圈与裂隙圈分界面上径向应力 ( $\text{MPa}$ )。

由于岩石种类、地质构造等诸多因素影响,目前难以得到准确统一的爆破损伤范围的确定方法。国内外研究学者通过大量研究,提出岩石爆破压碎区和裂隙区范围的估计方法。对于压碎区范围,郭文章等<sup>[14]</sup>认为粉碎区半径与装药半径之比  $d=2\sim 3$ ,林秀英<sup>[15]</sup>认为  $d=3\sim 7$ ,哈努卡耶夫<sup>[16]</sup>认为  $d=2\sim 3$ ,Donze 等<sup>[17]</sup>认为  $d\approx 5$ ;对于裂隙区范围,哈努卡耶夫认为裂隙区半径为装药半径 10~15 倍,戴俊<sup>[7]</sup>通过计算,得出几种常见岩石的裂隙区半径与炮孔半径之比大致在 10~15。综合以上研究成果,可大致认为,岩石单孔爆破压碎区半径  $R_1$  与装药半径  $r$  之比为 2~7,裂隙区半径  $R_2$  与装药半径  $r$  之比为 10~15。

根据图 3 模拟结果,在  $90^\circ$  范围内每隔  $9^\circ$  提取相同炮心距岩石单元的损伤并取其平均值,以此值作为该炮心距处岩石损伤值。岩石中爆炸波作用范围很大,文献<sup>[18]</sup>认为可达  $(120\sim 150)r$ 。由于炮心距较远时岩石损伤程度很低,一般不影响工程质量和安全,故作者认为  $D<0.05$  时,损伤可忽略不计,并以此方法确定出裂隙区范围。计算结果与其他方法所确定损伤范围的对比见表 2。可以看出本文模拟结果较为合理。

表 2 不同方法得到的爆破损伤范围比较

Tab. 2 Comparison of blasting damage ranges given by different methods

| 装药半径/cm | 压碎区 $R_1$ /cm |               |      | 裂隙区 $R_2$ /cm |                 |       |
|---------|---------------|---------------|------|---------------|-----------------|-------|
|         | 式(6)          | 经验值:2~7 倍装药半径 | 本文结果 | 式(7)          | 经验值:10~15 倍装药半径 | 本文结果  |
| 3       | 4~14          | 6~21          | 8~13 | 31~70         | 30~45           | 32~43 |

如图 4 所示,以  $K=1.1$  为例,得到压碎区边界岩石单元的应力时程曲线,其峰值应力为 194 MPa。通过理论公式<sup>[7]</sup>计算得到压碎区边界岩石最大应力为 207 MPa,与模拟值接近,进一步验证了本文所模拟结果的准确性。图 5 为压碎区半径与炮孔半径之比  $R_1/r_b$  和裂隙区半径与炮孔半径之比  $R_2/r_b$  随不耦合系数  $K$  增大的变化曲线。可以看出,随着不耦合系数逐渐增大,  $R_1/r_b$  与  $R_2/r_b$  均呈先快后慢的减小趋势,且裂隙区范围减小速率要大于压碎区。

当  $K > 2.0$  时,  $R_1/r_b \approx 1$ , 此时岩石压碎区很小, 可忽略不计。该规律在光面爆破技术中有所体现, 且与文献[19]得出的光面爆破不耦合装药系数宜采用 2~3 的结论相符。综合分析可知, 合理增大不耦合装药系数, 能够有效地减小炮孔周围岩石的损伤范围。

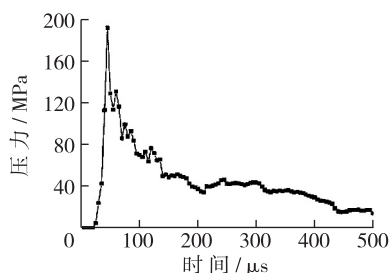


图4 压碎区边界压力时程曲线( $K=1.1$ )

Fig. 4 Time-history curves at boundary of crushed zone

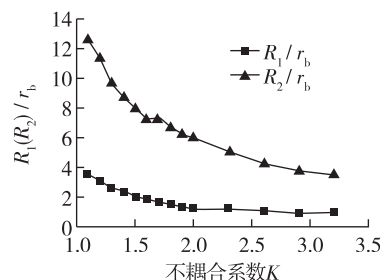


图5 随不耦合系数  $K$  变化的损伤范围

Fig. 5 Change of damage range with uncoupling coefficient  $K$

## 2.2 不同岩石爆破损伤分布规律

由于实际爆破工程中岩石种类不一, 各种岩石物理力学特性存在差异, 因此需要针对不同岩石研究其爆破损伤空间分布规律的差异性, 以便合理预测和控制损伤。建模方法同上, 分别采用石灰岩<sup>[11]</sup>、凝灰岩<sup>[11]</sup>和花岗斑岩<sup>[12]</sup>的 HJC 材料模型进行模拟, 其中部分参数见表 3。装药方式为耦合装药。沿炮孔中部横截面上的岩石损伤分布如图 6 所示。

表 3 岩石的部分 HJC 模型参数

Tab. 3 Partial parameters of HJC model for rocks

| 材料   | $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | $f_c / \text{MPa}$ | $A$   | $B$  | $N$  | $C$     | $T / \text{MPa}$ |
|------|------------------------------------------|--------------------|-------|------|------|---------|------------------|
| 凝灰岩  | 1.800                                    | 50.00              | 0.550 | 1.77 | 0.79 | 0.009 7 | 3.3              |
| 花岗斑岩 | 2.586                                    | 60.52              | 0.762 | 1.65 | 1.15 | 0.001 3 | 4.4              |

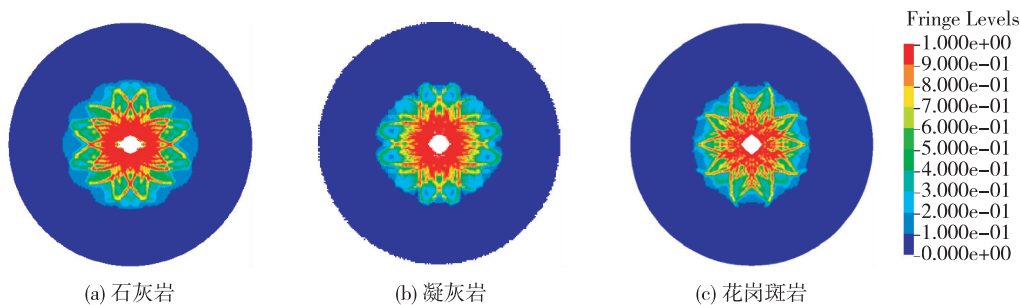


图6 不同岩石爆破损伤分布( $t=1 \text{ ms}$ )

Fig. 6 Distribution of blasting damage for different rocks ( $t=1 \text{ ms}$ )

从图 6 可见, 3 种岩石的爆破损伤程度都呈现出随炮心距增加而逐渐减小的分布规律, 符合岩石爆破破坏的形态特征。从裂隙发展看, 石灰岩、凝灰岩和花岗斑岩裂隙均发展明显, 其中花岗斑岩裂隙多而密; 从压碎区与裂隙区过渡看, 石灰岩和凝灰岩过渡界线相对清晰, 而花岗斑岩过渡界线不甚明显。图 7 对比了 3 种岩石压碎区边界单元压力时程曲线, 可以看出, 石灰岩和凝灰岩峰值比较接近, 花岗斑岩峰值约为前者两倍。

采用上文相同的损伤值获取方法, 获得不同炮心距岩石的损伤度。3 种岩石损伤度  $D$  随炮心距  $l$  在空间上的分布如图 8 所示。根据损伤度衰减趋势, 采用“S”形曲线的 Logistic 函数进行拟合,  $D$  与  $l$  的函数关系表达式为:

$$D = \frac{K_0}{1 + \exp(a + bl)} \quad (9)$$

式中:  $K_0, a, b$  为相关参数。

图 8 中曲线拟合度均达到 0.99, 说明拟合效果较好。I, II, III 分别表示岩石压碎区(完全损伤)、裂隙区(部分损伤)和弹性震动区(未损伤)。采用前文相同的方法确定损伤半径, 结果见表 4。

从图 8 可看出, 损伤分布曲线均大致呈现反“S”形。Fakhimi 等<sup>[20]</sup>通过研究爆生气体对裂隙扩展作用, 得出气体密度随炮心距增加的分布曲线, 以此反映裂隙分布, 其趋势与本文中的曲线趋势相符。从压碎区范围看, 石灰岩和凝灰岩的范围大小接近, 且明显大于花岗斑岩; 从损伤曲线衰减特征来看, 石灰岩和凝灰岩的损伤曲线在压碎区之后迅速下降, 而花岗斑岩的损伤曲线先是缓慢下降, 然后快速下降。前者表现出压碎区与裂隙区过渡界限明显的特征, 而后者表现出过渡界线不明显的特征, 这与前文通过图 6 的损伤云图直观分析得到的结论一致。分析其原因, 石灰岩和凝灰岩的动态强度特性较为接近, 在高温高压下易产生较大范围的压碎和开裂; 花岗斑岩属于火成岩, 特性与花岗岩类似, 具有较高的动态强度, 爆炸荷载下不易产生压碎性破坏, 而多产生裂纹。因此, 在实际爆破工程中, 应根据岩石种类特性的不同, 充分考虑不同岩石爆破损伤分布的差异性。

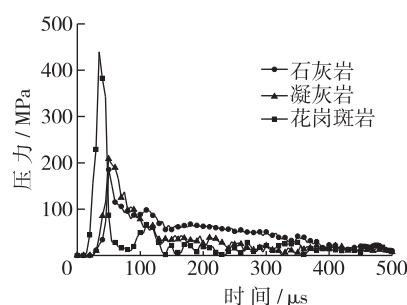


图 7 压碎区边界岩石压力时程曲线 ( $K=1.0$ )

Fig. 7 Time-history curves of pressure at boundary of rock crushed zone ( $K=1.0$ )

表 4 不同岩石损伤范围

Tab. 4 Damage scopes of different rocks

| 岩石类别 | 损伤半径/cm |       |
|------|---------|-------|
|      | $R_1$   | $R_2$ |
| 石灰岩  | 14      | 45    |
| 凝灰岩  | 13      | 44    |
| 花岗斑岩 | 7       | 42    |

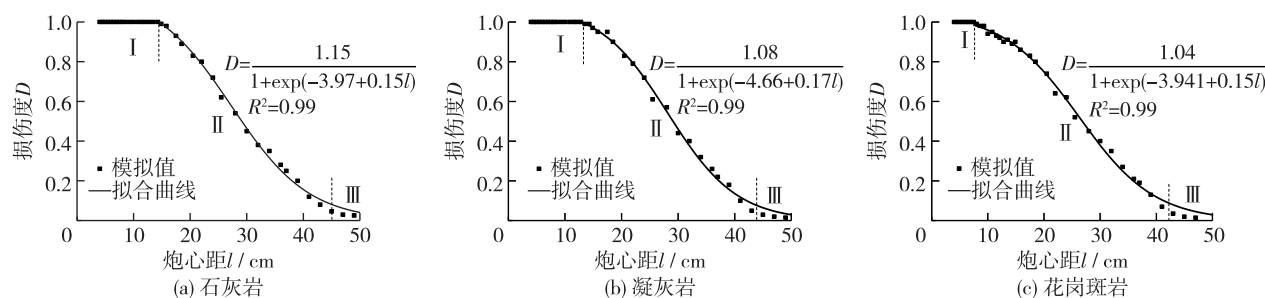


图 8 不同岩石损伤  $D$  分布规律

Fig. 8 Distribution law of damage parameter  $D$  of different rocks

### 3 结 语

本文通过模拟石灰岩在不耦合装药下的单孔爆破破坏过程, 探究了损伤范围随不耦合装药系数  $K$  变化的规律; 以石灰岩、凝灰岩和花岗斑岩为研究对象, 对比分析了耦合装药条件下岩石爆破损伤在空间上的分布规律, 得出以下主要结论:

(1) 岩石单孔爆破损伤范围随着不耦合系数增大, 压碎区和裂隙区半径与炮孔半径的比值均呈现先快后慢的减小趋势, 且裂隙区范围的减小幅度大于压碎区; 针对本文工况, 当  $K > 2$  时, 炮孔周围岩石几乎不产生压碎区。

(2) 不同种类岩石的爆破损伤曲线随炮心距增加均大致呈反“S”形衰减趋势, 但损伤分布特征有所差异。石灰岩和凝灰岩因其动态强度较低, 故压碎区较大, 且与裂隙区过渡界线清晰; 而花岗斑岩动态强度较高, 其压碎区较小, 与裂隙区界线不甚明显。

(3)HJC 模型在岩石爆破损伤特征的数值研究中具有较好的适用性。此外,文中计算假定岩石为均质材料,但实际岩石中含随机分布的裂纹等天然缺陷,而且大多处于初始应力状态,因此综合考虑这些因素对爆破损伤的影响尚待进一步研究。

## 参 考 文 献:

- [1] 王玉杰. 爆破工程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2007: 142-146. (WANG Yujie. Blasting engineering[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2007: 142-146. (in Chinese))
- [2] 左双英, 肖明, 续建科, 等. 隧道爆破开挖围岩动力损伤效应数值模拟[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3171-3176. (ZUO Shuangying, XIAO Ming, XU Jianke, et al. Numerical simulation of dynamic effect of surrounding rocks for tunnels by blasting excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3171-3176. (in Chinese))
- [3] 周燕, 叶海旺, 易长平, 等. 台阶爆破相邻炮孔间损伤范围的数值模拟[J]. 工程爆破, 2014, 20(2): 17-20. (ZHOU Yan, YE Haiwang, YI Changping, et al. Numerical simulation of damage zone between the adjacent boreholes in bench blasting[J]. Engineering Blasting, 2014, 20(2): 17-20. (in Chinese))
- [4] 胡英国, 卢文波, 金旭浩, 等. 岩石高边坡开挖爆破动力损伤的数值仿真[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(11): 2204-2213. (HU Yingguo, LU Wenbo, JIN Xuhao, et al. Numerical simulation for excavation blasting dynamic damage of rock high slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(11): 2204-2213. (in Chinese))
- [5] 杨建华, 卢文波, 胡英国, 等. 隧洞开挖重复爆炸荷载作用下围岩累计损伤特性[J]. 岩土力学, 2014, 35(2): 511-518. (YANG Jianhua, LU Wenbo, HU Yingguo, et al. Accumulated damage in surrounding rocks due to repeated blasting loads during blasting excavation of tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(2): 511-518. (in Chinese))
- [6] YU L Y, SU H J, LIU R C, et al. Experimental study of the influence of loading rate on tensile mechanical behavior of sandstone damaged by blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 93: 234-241.
- [7] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(2): 144-147. (DAI Jun. Calculation of rock crushed circle and fracture circle by column charge blasting[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2001, 20(2): 144-147. (in Chinese))
- [8] ESEN S, ONEDERRA I, BILGIN H A. Modelling the size of the crushed zone around a blast-hole[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(4): 485-495.
- [9] SIM Y, CHO G C, SONG K I. Prediction of fragmentation zone induced by blasting in rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(8): 2177-2192.
- [10] HOLMQUIST T J, JOHNSON G R, COOK W H. A computational constitutive model for concrete subjective to large strain, high strain rates, and high pressure[C]//1<sup>th</sup> International Symposium on Ballistic, Quebec City, Canada, 1993: 591-600.
- [11] 方秦, 孔祥振, 吴昊, 等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 197-204. (FANG Qin, KONG Xiangzhen, WU Hao, et al. Determination of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock[J]. Engineering Mechanics, 2014, 31(3): 197-204. (in Chinese))
- [12] 闻磊, 李夕兵, 吴秋红, 等. 花岗斑岩 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型参数研究[J]. 计算力学学报, 2016, 33(5): 725-731. (WEN Lei, LI Xibing, WU Qihong, et al. Parametric study on Holmquist-Johnson-Cook constitutive model of granite porphyry[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2016, 33(5): 725-731. (in Chinese))
- [13] 夏祥, 李海波, 李俊如, 等. 岩体爆生裂纹的数值模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1987-1991. (XIA Xiang, LI Haibo, LI Junru, et al. Numerical simulation of blast-induced cracks in rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(11): 1987-1991. (in Chinese))
- [14] 郭文章, 王树仁, 张奇. 节理岩体爆破的破裂规律分析[J]. 振动与冲击, 1999, 18(2): 30-34. (GUO Wenzhang, WANG Shuren, ZHANG Qi. Analysis of crack of jointed rock mass by blasting[J]. Journal of Vibration and Shock, 1999, 18(2): 30-34. (in Chinese))
- [15] 林秀英. 岩体爆破效应的测定与预测方法[J]. 西南工学院学报, 2000, 15(3): 53-56. (LIN Xiuying. Determination and prediction of blasting effect of rock mass[J]. Journal of Southwest Institute of Technology, 2000, 15(3): 53-56. (in Chinese))
- [16] 哈努卡耶夫 A H. 矿岩爆破物理过程[M]. 刘殿中, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1980: 1-25. (XAHYKAEB A H. The physical process of rock blasting[M]. Translated by LIU Dianzhong. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1980: 1-25. (in Chinese))

- [17] DONZÉ F V, BOUCHEZ J, MAGNIER S A. Modeling fractures in rock blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8): 1153-1163.
- [18] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2013: 143-148. (DAI Jun. Dynamic behaviors and blasting theory of rock[M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013: 143-148. (in Chinese))
- [19] 陈哲浩. 岩石中相邻炮孔爆破裂缝演化研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2016: 39-42. (CHEN Zhehao. Study on the blasting crack evolution of adjacent boreholes in rock[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016: 39-42. (in Chinese))
- [20] FAKHIMI A, LANARI M. DEM-SPH simulation of rock blasting[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55(2): 158-164.

## Simulation analysis of blast-induced damage scope and its distribution characteristics of rocks

HUANG Youpeng, WANG Zhiliang, BI Chengcheng

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to study the scope and distribution law of rock damage induced by blasting, using the Holmquist-Johnson-Cook model based on the LS-DYNA software, this study focuses on the variation of the blast damage scope of the limestone with the increase of a radial uncoupling coefficient  $K$ , and then the distribution law of damage under the condition of coupling charge is comparatively analyzed for the limestone, tuff and granite porphyry, and the damage evolution is further characterized by the Logistic function model. The simulation results show that the HJC constitutive model is capable of characterizing the blast-induced damage during the numerical simulation. The ratio of damage radius to bore-hole radius decreases fast first and then slowly with the increase of the radial uncoupling coefficient. The damage curves of different rocks all show an inverted-S attenuation, but there are some differences in the damage distribution characteristics. The crushing zones of the limestone and tuff are larger and the corresponding boundary between the crushing zone and the cracking zone is obvious, while the crushing zone of the granite porphyry becomes smaller and the corresponding boundary is indistinct. The research results can provide some technical references for the assessment and control of blast-induced damage in practical engineering.

**Key words:** rock; single-hole blasting; damage evolution; HJC constitutive model; numerical simulation