

# 炮孔间距对偏心不耦合装药贯通裂纹扩展的影响

张宪堂<sup>1,2</sup>, 刘小康<sup>2</sup>, 王向阳<sup>2</sup>, 周红敏<sup>1,2</sup>, 王洪立<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 山东省土木工程防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 土木工程与建筑学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:**为研究光面爆破中偏心不耦合装药炮孔间距对贯通裂纹扩展的影响,利用同心不耦合装药的孔壁压力计算公式并结合应力波叠加原理,推导偏心不耦合装药的炮孔间距计算方法。基于求得的炮孔间距范围,计算 3 种岩石介质在不同炮孔间距条件下贯通裂纹的扩展位置,并选择砂岩材料进行数值模拟。结果表明:偏心不耦合装药爆破中,贯通裂纹主要集中于偏心侧;抗拉强度大的岩石,贯通裂纹偏离炮孔连心线的程度也较大。砂岩的炮孔间距为 60 cm 时,贯通裂纹扩展方向与炮孔连心线重合,连心线下方出现裂纹比较集中的贯通区域;炮孔间距的增大导致贯通裂纹远离炮孔连心线,从而造成欠挖。偏心不耦合装药爆破后,偏心侧岩石的损伤明显大于非偏心侧。

**关键词:**光面爆破;偏心不耦合装药;炮孔间距;贯通裂纹;炮孔连心线

**中图分类号:**TD235

**文献标志码:**A

## Influence of blast hole spacing on penetrating crack propagation of eccentric uncoupled charge

ZHANG Xiantang<sup>1,2</sup>, LIU Xiaokang<sup>2</sup>, WANG Xiangyang<sup>2</sup>, ZHOU Hongmin<sup>1,2</sup>, WANG Hongli<sup>1</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** In order to study the influence of hole spacing of eccentric uncoupled charge on the penetrating crack propagation in smooth blasting, this paper first deduced the calculation method for hole spacing of eccentric uncoupled charge by using the formula of hole wall pressure of concentric uncoupled charge and the superposition principle of stress wave. Then, based on the obtained range of hole spacing, the propagation positions of penetrating cracks in three kinds of rock under different hole spacings were calculated. Finally, sandstone material was selected for numerical simulation. The results show that the penetrating crack is distributed on the eccentric side in eccentric uncoupled charge blasting and that the rock with high tensile strength has a large degree of deviation from the hole connection center line. When the hole spacing of sandstone is 60 cm, the propagation direction of penetrating crack coincides with the center line of the hole, and concentrated penetrating crack area appears below the center line. The increase of the hole spacing causes the penetrating crack to move away from the center line, resulting in under-excavation. After the eccentric decoupled charge blasting, the damage of rock on the eccentric side is obviously greater than that on the non-eccentric side.

**Key words:** smooth blasting; eccentric uncoupled charge; blast hole spacing; penetrating crack; hole connection center line

**收稿日期:**2023-12-15

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51874189);山东省自然科学基金项目(ZR2023ME106);2021 年度矿山地下工程教育部工程研究中心开放基金项目(JYBGCZX2021102)

**作者简介:**张宪堂(1973—),男,河北井陘人,教授,博士生导师,主要从事岩土结构动力学和爆破工程研究。

E-mail:zzxhtm@sdust.edu.cn

周红敏(1975—),女,河北新乐人,副教授,博士,主要从事工程防灾减灾控制研究,本文通信作者。

E-mail:skd992064@sdust.edu.cn

为形成平整轮廓面,光面爆破工程通常采用不耦合装药。由于炮孔处于水平或者倾斜状态,炸药会因重力作用紧贴炮孔壁一侧,从而形成偏心不耦合装药结构<sup>[1]</sup>。在实际工程爆破中,炮孔间距不合理会造成炸药的极度浪费或岩石破碎不充分、增加爆破成本和安全隐患等,因此选择合理的炮孔间距对光面爆破效果有着至关重要的作用<sup>[2]</sup>。田文高等<sup>[3]</sup>提出一种能够表征偏心不耦合装药炮孔壁不同位置应力的参数,得到偏心不耦合装药爆破的最佳偏心不耦合系数。李新平等<sup>[4]</sup>利用动力分析软件对不同装药结构进行了数值模拟计算,基于偏心装药结构进行模拟优化研究,分析不同不耦合系数及炮孔间距模型的预裂成缝效果,当不耦合系数为 1.68、炮孔间距为 70 cm 时,预裂爆破效果最好。Zou 等<sup>[5]</sup>使用 LS-DYNA 建立三维数值模型,采用正交设计优化模拟方案,并通过极差分析确定相关因素的敏感性,结果表明:为改进光面爆破参数设计,应首先确定岩体类型、周边孔间距、最小抵抗线等主导因素的最优值,装药密度对爆破影响较小。付玉华等<sup>[6]</sup>分别提出了普通光面爆破参数计算公式和考虑损伤后的计算公式,工程实例验证结果表明:提出的两类公式适用于不同围岩条件,采用考虑损伤后的计算公式时,可以适当增大炮孔间距。张建国等<sup>[7]</sup>为控制隧道爆破过程中的超挖现象,以页岩为研究对象,设置了 5 种不同的炮孔间距进行现场爆破实验,发现当周边孔间距为 55 cm 时,可以有效控制超欠挖。李禹锡等<sup>[8]</sup>利用同心不耦合装药时的爆破参数,推导了不同不耦合系数条件下炮孔间距的计算方法,代入雷管与有机玻璃板的参数,得到了不同装药结构下的最大孔间距。周艳等<sup>[9]</sup>利用石灰石爆破模型,对两炮孔之间的损伤规律进行研究,发现炮孔之间的损伤随着炮孔间距的增大先增大后减小,最后趋于稳定。

在偏心不耦合装药中,偏心作用使得作用于炮孔周围的爆炸能量分布不均匀,造成爆破效果达不到预期目标<sup>[10]</sup>。针对炮孔间距对光面爆破效果的影响规律,学者们基于现有的光面爆破理论及同心不耦合装药结构等进行了研究,但对偏心不耦合装药爆破时炮孔间距对裂纹扩展的影响规律及炮孔间距的选择依据研究较少。因此本研究基于应力波与爆生气体的综合作用理论,通过理论推导得到光面爆破偏心不耦合装药炮孔间距的计算方法,对不同炮孔间距条件下贯通裂纹的位置进行了分析,并利用模型试验和数值模拟进行验证。

### 1 偏心不耦合装药炮孔间距的计算

在偏心不耦合装药结构中,药卷中心到炮孔壁不同位置处的距离不同,可将炮孔壁上任意一点至药卷中心的距离与药卷半径之比定义为点偏心不耦合系数,偏心不耦合装药结构如图 1 所示。

炮孔壁上任一点  $M$  的偏心不耦合系数  $K_M$  可表示为:

$$K_M = \frac{r_{MO_1}}{r_2} = \frac{\sqrt{(r_1 \sin \theta)^2 + (r_1 \cos \theta - r_1 + r_2)^2}}{r_2}, \quad (1)$$

式中: $r_1$  为炮孔半径,cm; $r_2$  为药卷半径,cm; $\theta$  为直线  $OO_1$  与直线  $OM$  的夹角, $(^\circ)$ 。

基于同心不耦合装药孔壁压力计算方法,通过几何关系推导得出偏心不耦合装药结构中孔壁各点(除耦合点)的初始径向应力峰值<sup>[10]</sup>。

$$P_M = \frac{1}{8} \rho_0 D^2 K_M^{-2\tau} n. \quad (2)$$

式中: $P_M$  为偏心不耦合装药炮孔壁上任意一点  $M$  的初始径向应力峰值,Pa; $\rho_0$  为炸药的密度, $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $D$  为炸药的爆速, $\text{m}/\text{s}$ ;  $n$  为孔壁压力增大系数,用透射压力与入射压力的比值来计算; $\tau$  为绝热指数。

计算初始径向应力峰值时,通常将孔壁压力增大系数  $n$  视为定值,忽略了不耦合装药系数对空气冲击波与炮孔壁相互作用的影响,导致计算值存在误差。目前对压力增大系数的研究多采用数值模拟<sup>[11]</sup>,通过建立不同装药结构条件下的单孔偏心不耦合装药模型,在孔壁上选取单元测点,对透射压力与入射压力进行统计,并计算偏心不耦合装药爆破时透射压力与入射压力的比值。由于炮孔的柱面效应,空气冲击波的入射

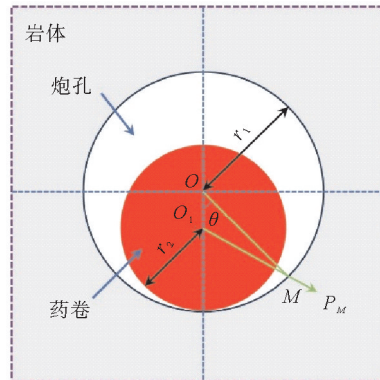


图 1 偏心不耦合装药结构示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of eccentric uncoupled charge structure

压力随不耦合系数的增大明显减小,但其反射压力未遵循上述衰减关系,且在一定不耦合系数范围内,冲击波在炮孔内发生透、反射叠加效应。因此,压力增大系数非定值,根据爆生气体经历的膨胀阶段不同,对压力增大系数进行拟合,拟合结果如图 2 所示。

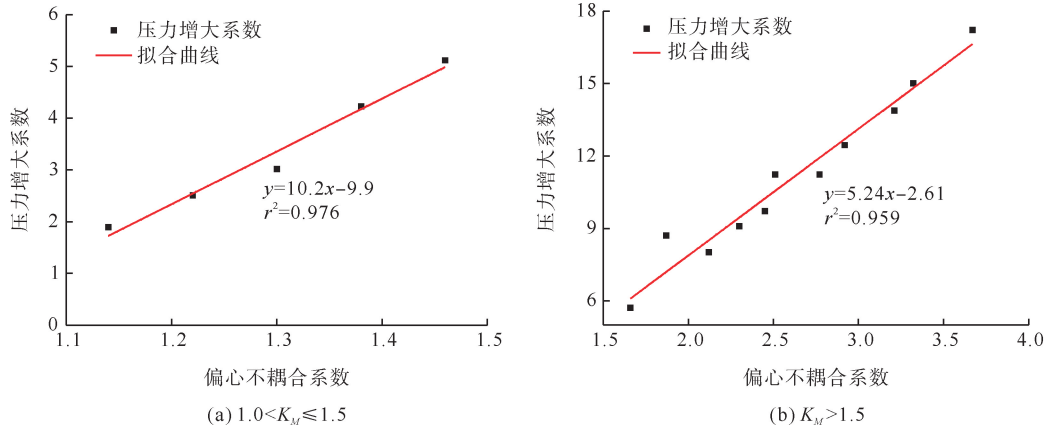


图 2 偏心不耦合装药压力增大系数拟合曲线

Fig. 2 Pressure increase coefficient fitting curves of eccentric uncoupled charge

因此偏心不耦合装药爆破中计算压力增大系数( $n'$ )的拟合公式为:

$$n' = 10.2K_M - 9.9, 1.0 < K_M \leq 1.5; \quad (3)$$

$$n' = 5.24K_M - 2.61, K_M > 1.5. \quad (4)$$

由文献[8]可知,当炮孔间形成贯通裂纹时,两炮孔连心线中点位置处的最大切向拉应力为:

$$\sigma_\theta = \frac{2bP_0}{\left(\frac{l}{r_1}\right)^\alpha}, \quad (5)$$

式中: $P_0$  为  $P_M$  在水平方向分力的最大值,Pa; $l$  为孔间岩石某一点到炮孔中心的距离,cm, $l = R/2$ ;  $R$  为炮孔间距,cm; $\alpha$  为应力波的距离衰减指数, $\alpha = 2 - b$ ,  $b = \mu / (1 - \mu)$ ,  $\mu$  为岩石的泊松比。

当两炮孔间的切向拉应力大于岩石的抗拉强度时,岩石发生开裂。根据止裂条件,假设炮孔连心线中点处的合成切向拉应力等于岩石的抗拉强度,此时贯通裂纹长度达到最大值,结合式(1)~(4),能够得出偏心不耦合装药结构中炮孔间距的计算方法为:

$$R = \left(\frac{2bP_0}{\sigma_t}\right)^{\frac{1}{\alpha}} r_1. \quad (6)$$

式中: $\sigma_t$  为岩石的动态抗拉强度,Pa。

考虑爆生气体的二次楔入作用,在经验公式的基础上再进一步研究。爆生气体的二次楔入作用如图 3 所示, $L$  为裂纹的最终长度, $L'$  为爆生气体的楔入长度, $L_0$  为爆轰波形成的裂纹长度<sup>[12]</sup>。

文献[13]根据爆生气体产生的爆压和裂隙的止裂条件得到了造成裂隙扩展的平均压力:

$$P_s = \frac{P_m + P^*}{2}, \quad (7)$$

式中: $P_m$  为爆生气体产生的爆压,Pa; $P^*$  为裂隙停止发育时爆生气体的准静态压力,Pa。

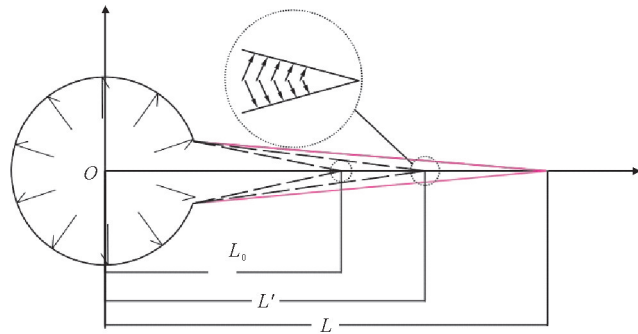


图 3 爆生气体二次驱动裂纹扩展模型

Fig. 3 Model of secondary crack propagation driven by detonation gas

$$P_m = \frac{P_0 V_0 T}{273(V_1 - \alpha)}, \tag{8}$$

$$P^* = \sqrt{\frac{\pi}{4R}} K_{IC} \tag{9}$$

式中： $P_0$  为大气压强，Pa； $V_0$  为爆容，L； $T$  为炸药爆温， $^{\circ}\text{C}$ ； $V_1$  为炸药比容，L/kg； $K_{IC}$  为岩石的断裂韧度， $\text{Pa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 。

弹性力学中切向应力的计算方法为：

$$\sigma_{\theta} = \frac{P_s r_1^2}{R^2} \tag{10}$$

结合公式(6)~(10)可得出炮孔间距的最大理论值为：

$$R_{\max} = \left( \frac{P_m + P^*}{2\sigma_t} \right)^{\frac{1}{2}} r_1 \tag{11}$$

程兵等<sup>[1]</sup>取装药不耦合系数 1.71 为最佳的偏心不耦合装药结构，取  $r_1 = 2.7 \text{ cm}$ 。利用式(6)和式(11)计算得到偏心不耦合装药的炮孔间距的经验值和最大值，利用式(6)计算炮孔间距时只考虑了应力波的作用<sup>[14]</sup>，式(11)没有考虑另一侧炮孔爆炸应力波对裂纹扩展的抑制作用。光面爆破最理想的效果为炮孔连心线上形成贯通裂纹，将岩石的材料参数(见文献[13])代入公式，并选择工程中比较常用的乳化炸药来计算，取  $D = 3\ 200 \text{ m/s}$ ， $\rho_0 = 1\ 200 \text{ kg/m}^3$ ，计算得出： $R = 68.1 \text{ cm}$ ， $R_{\max} = 92.1 \text{ cm}$ ，即合理的炮孔间距为炮孔直径的 12.6~17.1 倍。

利用 MATLAB 对  $P_M$  和  $P_0$  进行计算，得到图 4 所示的曲线。随着  $\theta$  增大， $P_M$  与  $P_0$  的曲线逐渐重合，因此式(6)中用水平分力代替初始径向应力峰值来计算炮孔间距是合理的。其中  $M_n$  点代表不同炮孔间距条件下，贯通裂纹的起裂位置，即对应不同的  $\theta$ ，计算得到的数据如表 1 所示。偏心不耦合装药爆破中，当炮孔间距设置合理时，贯通裂纹主要分布在炮孔连心线的下方，且随着炮孔间距的增大，贯通裂纹的起裂位置逐渐远离炮孔连心线。当岩石材料为砂岩，炮孔间距为 60 cm 时， $\theta$  接近  $90^{\circ}$ ，此时贯通裂纹与炮孔连心线几乎重合。岩石材料发生改变，相同炮孔间距条件下， $\theta$  随着岩石抗拉强度的增大而减小，贯通裂纹偏离炮孔连心线的程度也随之增大。为了验证理论计算的准确性，基于模型试验和数值模拟计算，选择砂岩材料对不同炮孔间距下的裂纹扩展规律进行研究。

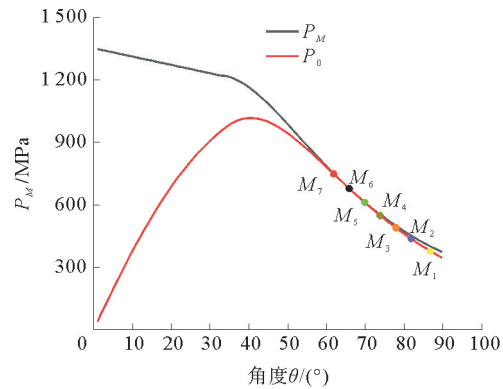


图 4 初始径向应力峰值  
Fig. 4 Initial radial stress peak

表 1 不同炮孔间距的贯通裂纹位置

Table 1 Location of penetrating cracks with different hole spacings

起裂点	炮孔间距/cm	砂岩		石灰岩		花岗岩	
		$P_0/\text{MPa}$	$\theta/(^{\circ})$	$P_0/\text{MPa}$	$\theta/(^{\circ})$	$P_0/\text{MPa}$	$\theta/(^{\circ})$
$M_1$	60	383	86.73	496	77.76	512	75.77
$M_2$	65	437	81.75	553	73.78	693	64.81
$M_3$	70	493	78.76	610	69.79	786	59.82
$M_4$	75	551	73.77	669	66.80	869	54.84
$M_5$	80	613	69.79	730	62.81	923	51.42
$M_6$	85	676	65.80	791	59.82	1 016	40.88
$M_7$	90	742	61.81	854	55.83	1 130	37.89

## 2 双孔爆破试验

### 2.1 试验方案设计

为进行爆破模型试验, Rossmanith 等<sup>[15]</sup>通过对比分析均质岩石与有机玻璃板材料在同等爆破条件下的破坏结果,发现二者的破坏形式及断裂行为极为相似。有机玻璃具有较好透光性,可以直观地观察爆破裂纹的扩展规律,且抗压强度与砂岩相近,因此对爆炸冲击荷载作用下岩石的破坏机理进行研究时,可以将有机玻璃板作为脆性岩石的替代材料。根据爆破荷载形式,采用平面应变模型,试验模型长×宽×高为 40 cm×30 cm×0.5 cm。为获得最佳爆破效果,本次试验模型采用径向不耦合装药,炮孔直径为 1.2 cm,药卷用电子雷管代替,直径为 0.7 cm,电子雷管用胶水粘合于炮孔壁一侧。参考文献[8]炮孔间距的计算方法,将有机玻璃板参数(见文献[10])代入式(6),可得到同心不耦合装药时炮孔间距为 3.2 cm,偏心不耦合装药对应的炮孔间距为 8.1 cm,考虑玻璃板试验中无法对炮孔底部进行有效封堵,影响裂纹扩展长度,因此将炮孔间距分别设置为 3、5 和 7 cm,即模型 I、II、III。

### 2.2 试验结果分析

图 5 为模型试验的最终破坏效果图,表 2 对各模型爆后的裂纹长度进行了统计。当  $R$  为 3 cm 或 5 cm 时,偏心侧均出现了 4~5 条的主裂纹,非偏心侧的主裂纹主要集中于炮孔连心线附近;  $R$  为 7 cm 时,炮孔连心线的方向出现了 1 条贯通裂纹。模型爆炸后均出现了明显的偏心效果,偏心侧裂纹数量和长度均大于非偏心侧,随着炮孔间距的增大,炮孔附近的裂纹扩展更加充分。

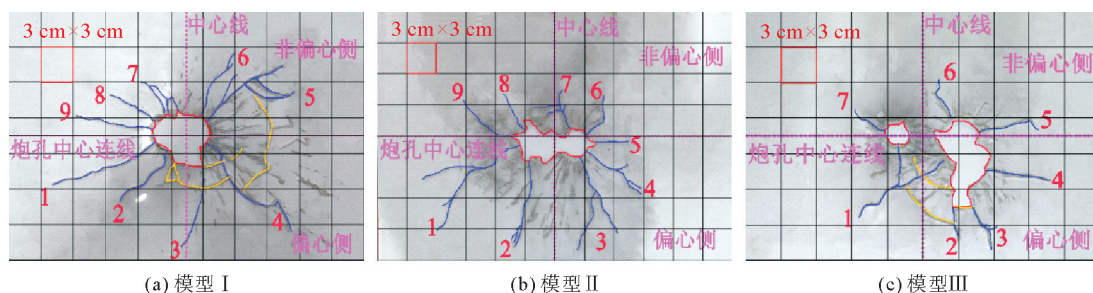


图 5 模型破坏效果图

Fig. 5 Effect diagram of model destruction

表 2 偏心不耦合装药爆破裂纹长度

Table 2 Crack length of eccentric uncoupled charge blasting

cm

裂纹编号	模型 I	模型 II	模型 III
1	10.1	11.1	11.6
2	5.9	10.9	11.1
3	6.7	11.6	11.7
4	9.7	10.3	10.7
5	4.7	3.2	4.1
6	3.3	2.2	2.3
7	3.1	2.9	2.3
8	2.5	2.7	—
9	4.6	3.1	—

### 2.3 分形维数分析

已有研究<sup>[16]</sup>表明:岩石爆破的损伤变化及岩石破碎后的块度都符合分形计算的特征,通过对偏心侧与

非偏心侧区域进行分形维数研究,可以帮助了解偏心不耦合装药爆破后的损伤程度。利用 MATLAB 内置 im2bw 函数对模型Ⅲ爆破后的损伤图像进行二值化处理,然后进行盒维数的计算。根据盒维数的基本原理,分形维数可表示为:

$$F = -\lim_{\gamma \rightarrow 0} \frac{\lg N(\gamma)}{\lg \gamma} \tag{12}$$

式中: $F$  为分形维数, $\gamma$  为盒子的边长, $N(\gamma)$  为覆盖分形图像的非空盒子数。

分析模型试验结果,当炮孔间距为 7 cm 时,炮孔连心线方向出现了 1 条贯通裂纹且炮孔间区域保留完整,因此对模型Ⅲ爆破后的损伤进行研究更具有代表性。图 6 所示为偏心侧和非偏心侧的盒维数拟合曲线。两区域试验结果分形计算拟合曲线均为直线,且相关系数均大于 0.96,拟合效果较好。偏心侧的分形维数为 1.399 6,非偏心侧的分形维数为 1.075 5,偏心侧的分形维数大于非偏心侧,偏心侧的分形损伤是非偏心侧的 1.3 倍。由此证明偏心不耦合装药会严重影响光面爆破的效果,偏心侧的岩体损伤分布明显优于非偏心侧,炮孔间距设置合理时仍可以在炮孔连心线附近形成贯通裂纹。

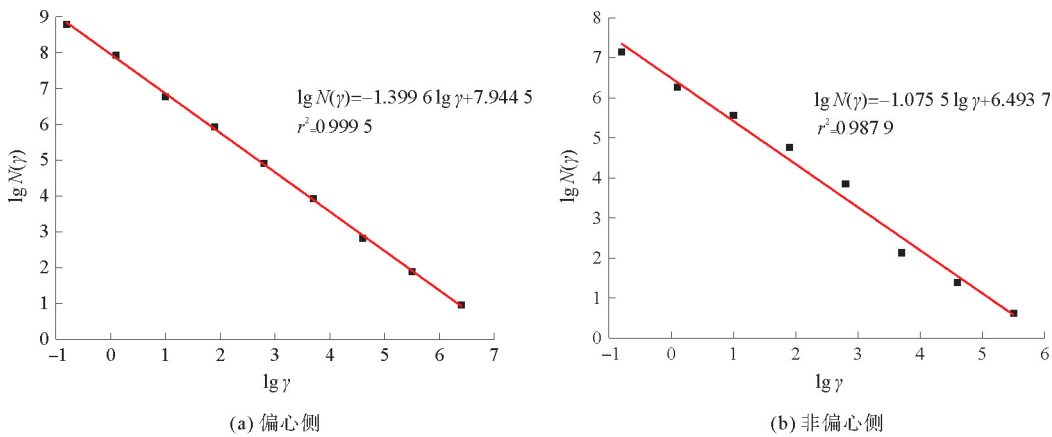


图 6 R=7 cm 时分形维数

Fig. 6 Fractal dimension at R=7 cm

### 3 双孔偏心不耦合装药数值模拟

#### 3.1 物理模型

为研究爆破过程中裂纹的扩展规律,炸药和空气均采用 Euler 算法,岩石采用 Lagrange 算法。炮孔装药不耦合系数为 1.7,炮孔直径 5.4 cm<sup>[10]</sup>,模型 I~III 的炮孔间距分别为 60、70、80 cm,模型尺寸为 240 cm×160 cm×0.6 cm,将炸药、空气、岩石的网格划分都控制在 0.2 cm,岩石四周设置无反射边界<sup>[17]</sup>。图 7 为模型示意图。

#### 3.2 计算材料参数

岩石材料选用砂岩代替,岩石的本构模型采用 Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT)

模型,通过关键字 \* MAT\_RHT 来定义砂岩的材料参数。具体材料参数如表 3 所示<sup>[17]</sup>。

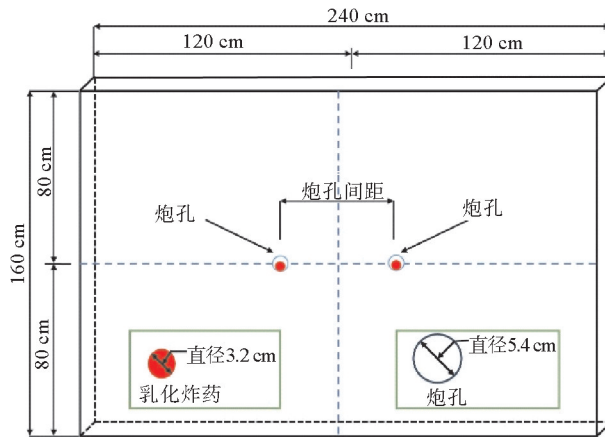


图 7 数值模型示意图

Fig. 7 Schematic diagram of numerical model

表 3 岩石材料参数

Table 3 Rock material parameters

密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa	抗压强度/GPa	抗拉强度/GPa	切线模量/GPa
2 060	68.00	0.27	150.00	0.119	0.005 6	7.0

选取 LS-DYNA 中自带的 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 高爆模型并通过 \* EOS\_JWL 状态方程描述爆轰产物压力-体积的关系,其状态方程为<sup>[18]</sup>:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (13)$$

式中: $P$  为爆轰产物的压力; $E_0$  为爆轰产物的初始内能密度; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  均为材料参数,体积分数的值取 1。具体参数如表 4 所示<sup>[16]</sup>。

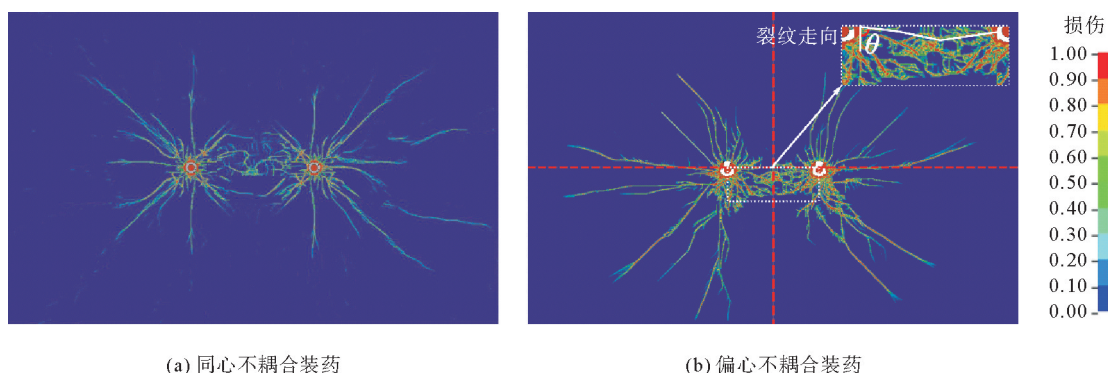
表 4 炸药及状态方程参数

Table 4 Explosives and state equation parameters

密度/(kg/m <sup>3</sup> )	爆速/(m/s)	Jones-Wilkins-Lee 状态方程参数					
		$A$ /GPa	$B$ /GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$E_0$ /GPa
1 200	3 200	47.60	0.529	3.50	0.16	0.41	4.5

### 3.3 岩石损伤效应分析

文献[2]基于数值模拟结果,取周边孔间距 60 cm 为优化后的孔间距应用于实际工程。将同心与偏心不耦合的爆破效果进行对比,建立  $R=60$  cm 的对照组,图 8 为最终时刻不同装药结构下岩石的损伤分布。

图 8  $R=60$  cm 时岩石损伤分布Fig. 8 Rock damage distribution at  $R=60$  cm

如图 8 所示,对于同心不耦合装药爆破模型,炸药爆炸后作用于炮孔壁的能量相同,各炮孔周围形成的粉碎区半径相同,在爆炸荷载的作用下裂纹持续扩展,最终岩石炮孔连心线的上下两侧形成了相互对称的贯通裂纹,对保留侧岩石造成超挖。对于偏心不耦合装药爆破,由于炮孔内空气层厚度的分布不均匀,导致偏心侧的粉碎区面积远大于非偏心侧,非偏心侧岩石几乎没有出现粉碎区,且偏心侧的裂纹长度与数量均大于非偏心侧。当  $R=60$  cm 时,受爆炸荷载的作用,炮孔连心线下方出现裂纹比较集中的贯通区域。

图 9 为偏心不耦合装药时, $R$  分别为 70、80 cm 岩石最终时刻的损伤分布。当炮孔间距为 70 cm 时,炮孔连心线下方也出现贯通裂纹,区域裂纹条数明显减小,贯通裂纹走向偏离炮孔连心线;炮孔间距为 80 cm 时,炮孔间偏心侧形成了 1 条远离炮孔连心线的斜向贯通裂纹。

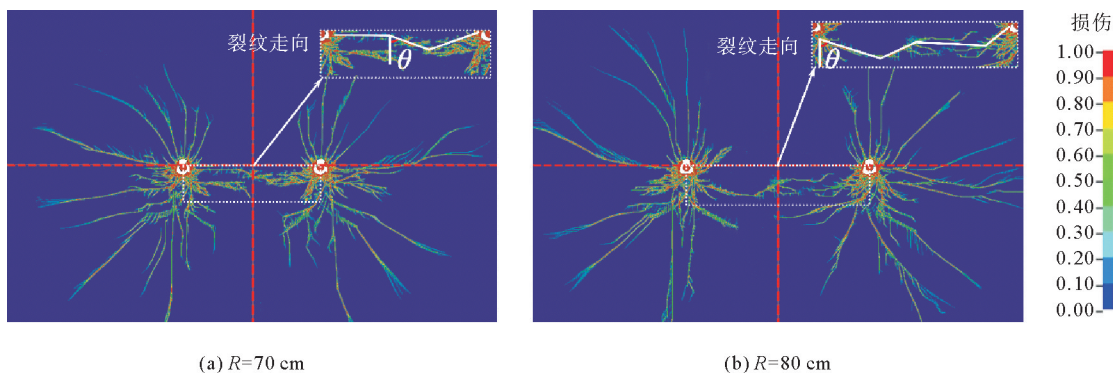


图9 偏心不耦合装药的岩石损伤分布

Fig. 9 Rock damage distribution of eccentric uncoupled charge

图10为 $\theta=0^\circ\sim 90^\circ$ 时,不同炮孔间距下孔壁压力峰值随 $\theta$ 变化的曲线。根据图8与图9中炮孔间贯通裂纹的裂纹走向,在软件后处理中依据网格划分规律得到贯通裂纹起裂点对应的 $\theta$ 值。由图10可知,随着孔间距的增大, $\theta$ 对应的角度分别为 $90^\circ$ 、 $85^\circ$ 、 $70^\circ$ ,从而证明炮孔间贯通裂纹随孔间距增大逐渐偏离炮孔连心线,贯通裂纹多分布于偏心侧。对比表1中的理论计算值,数值模拟与理论计算结果一致。

综上所述,偏心不耦合装药爆破中岩石的损伤分布表现为偏心效应,偏心侧岩石的损伤明显优于非偏心侧;不同炮孔间距下,炮孔间偏心侧区域均出现贯通裂纹,当 $R=60\text{ cm}$ 时,贯通裂纹与炮孔连心线几乎重合,大大减小了爆炸荷载对非偏心侧岩石的损伤;随着炮孔间距的增大,贯通裂纹逐渐远离炮孔连心线且贯通区域面积逐渐减小,从而造成欠挖现象。

### 3.4 “偏心效应”分析

为进一步研究偏心不耦合装药爆破的“偏心效应”,对各区域的裂纹长度和应力进行分析。图11是应力的测点布置图,图12为不同炮孔间距时各测点的应力峰值曲线,图13对不同炮孔间距时各区域裂纹的平均长度进行了对比。

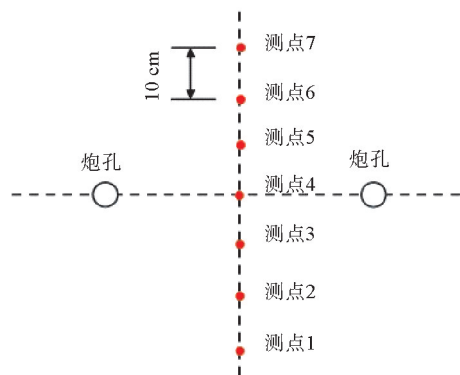


图11 测点选取示意图

Fig. 11 Schematic diagram of measuring point selection

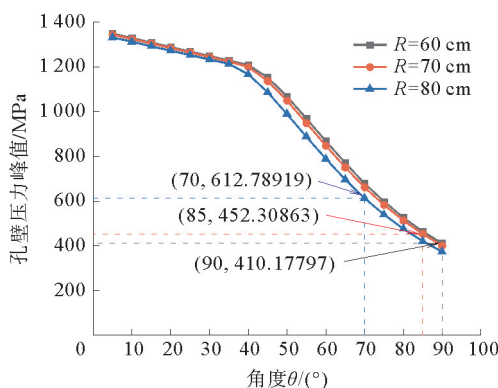


图10 不同炮孔间距下的孔壁压力峰值

Fig. 10 Hole wall pressure peak of different hole spacings

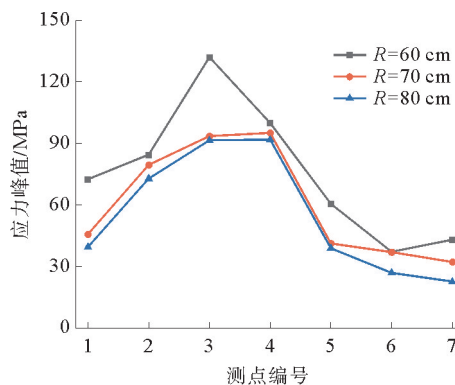


图12 所选单元有效应力峰值曲线

Fig. 12 Effective stress peak curve of selected elements



如图 12 所示,不同炮孔间距下,应力峰值的最大值分别为 135.1 MPa(测点 3)、100 MPa(测点 4)和 91.8 MPa(测点 3),有效应力峰值均位于连心线下方 0~10 cm 处。3 种不同炮孔间距条件下,测点 4 到测点 5 的应力峰值下降速率分别为 2.19、3.12 和 1.27 MPa/ $\mu$ s,测点 4 到测点 3 应力下降速率分别为 1.42、0.82 和 1.27 MPa/ $\mu$ s。综合上述分析,偏心不耦合装药时炮孔间的应力峰值集中于炮孔连心线的下方,测点应力曲线出现“偏心效应”;对比炮孔连心线上下两侧的应力变化,偏心侧应力峰值下降速率远小于非偏心侧,因此偏心侧出现多条比较集中的贯通裂纹,偏心侧的损伤程度远大于非偏心侧。

由图 13 可知,偏心侧与非偏心侧裂纹长度比值保持在 1.35~1.40,模型试验的比值大于模拟值,偏心侧与非偏心侧的裂纹长度比值不受炮孔间距的影响,且该值与模型试验中通过分形维数计算得到的偏心侧与非偏心侧的损伤比值接近。对比试验与数值模拟的结果,二者存在一定的差距,这是因为进行玻璃板爆破试验时,没有对炮孔底部进行封堵,从而导致爆生气体的快速逸散,爆炸能量没有完全作用于炮孔壁,非偏心侧的裂纹长度扩展不充分。

#### 4 结论

1) 结合应力波与爆生气体的综合作用理论以及光面爆破同心不耦合装药孔壁压力计算公式,推导出偏心不耦合装药的炮孔间距理论计算方法。基于计算得到的炮孔间距范围,爆破后贯通裂纹主要集中于偏心侧,随着炮孔间距的增大,贯通裂纹逐渐远离炮孔连心线;相同炮孔间距条件下,随着岩石抗拉强度的增大,贯通裂纹偏离炮孔连心线的程度逐渐增大。

2) 不同炮孔间距下,理论计算结果与数值模拟具有一致性,砂岩在炮孔间距为 60 cm 时,贯通裂纹扩展方向与炮孔连心线重合,且炮孔连心线的下方出现了裂纹集中的贯通区域,爆破后有利于形成规整的轮廓线;随着炮孔间距的增大,贯通裂纹的扩展方向逐渐偏离炮孔连心线,易导致欠挖现象。

3) 模型试验与数值模拟显示,偏心侧应力峰值大于非偏心侧,使得偏心不耦合装药爆破中的岩石损伤出现明显的偏心效应,偏心侧岩石的损伤程度明显大于非偏心侧。

#### 参考文献:

- [1] 程兵,汪海波,王梦想,等. 炮孔偏心不耦合装药爆破效应数值模拟[J]. 中国安全生产科学技术,2018,14(7):40-47.  
CHENG Bing, WANG Haibo, WANG Mengxiang, et al. Numerical simulation on blasting effect of blast hole with eccentric decouple charge[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2018, 14(7): 40-47.
- [2] 张理维,王卫华,戴怡文. 基于岩石爆破损伤的炮孔布置优化研究[J]. 爆破,2020,37(1):32-39.  
ZHANG Liwei, WANG Weihua, DAI Yiwen. Blast hole arrangement optimization based on rock blasting damage[J]. Blasting, 2020, 37(1): 32-39.
- [3] 田文高,蒲传金,陈晓玲. 偏心不耦合装药爆破参数理论分析[J]. 爆破,2008(2):19-20.  
TIAN Wengao, PU Chuanjin, CHEN Xiaoling. Theoretical analysis on the parameters of eccentric decouple charge blasting[J]. Blasting, 2008(2): 19-20.
- [4] 李新平,陈萍萍,罗忆,等. 非对称不耦合装药结构对预裂爆破效果的影响[J]. 爆破,2017,34(3):25-30.  
LI Xinping, CHEN Pingping, LUO Yi, et al. Impacts of asymmetric decoupling charge structure on presplitting blasting effect[J]. Blasting, 2017, 34(3): 25-30.
- [5] ZOU B P, XU Z P, WANG J X, et al. Numerical investigation on influential factors for quality of smooth blasting in rock tunnels[J/OL]. Advances in Civil Engineering, 2020. DOI:10.1155/2020/9854313.

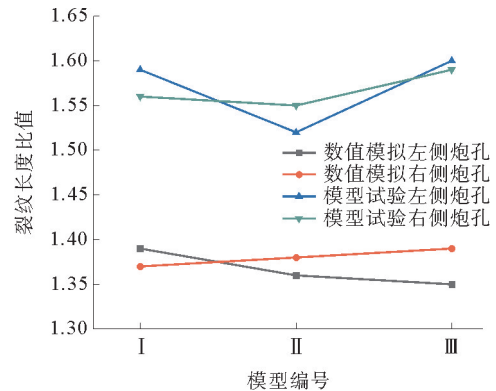


图 13 裂纹长度比值

Fig. 13 Ratio of crack length

- [6] 付玉华,王兴明,欧阳小芽.岩体巷道光面爆破参数比较分析与应用[J].江西理工大学学报,2009,30(6):6-10.  
FU Yuhua,WANG Xingming,OUYANG Xiaoya. Application and comparative analysis on smooth blasting parameters of rock mass tunnels[J]. Journal of Jiangxi University of Science and Technology,2009,30(6):6-10.
- [7] 张建国,杨文,拜晓亮,等.粉砂质页岩段隧道光面爆破周边孔间距试验研究[J].工程爆破,2022,28(6):66-72.  
ZHANG Jianguo,YANG Wen,BAI Xiaoliang, et al. Experimental study on hole spacing around smooth blasting in silty shale tunnel[J]. Engineering Blasting,2022,28(6):66-72.
- [8] 李禹锡,蒲传金,李健钰,等.偏心不耦合装药爆破孔间距理论分析与计算[J].化工矿物与加工,2017,46(1):33-37.  
LI Yuxi,PU Chuanjin,LI Jianyu,et al. Theoretical analysis and calculation of the spacing between the eccentric and decoupled charge blasting holes[J]. Industrial Minerals and Processing,2017,46(1):33-37.
- [9] 周艳,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.
- [10] 张向阳.偏心不耦合装药结构爆破损伤分布与裂隙扩展特征研究[D].济南:山东建筑大学,2021.  
ZHANG Xiangyang. Research on blasting damage distribution and crack propagation characteristics of eccentric decoupled charge structure[D]. Jinan:Shandong Jianzhu University,2021.
- [11] 叶志伟,陈明,李桐,等.小不耦合系数装药爆破孔壁压力峰值计算方法[J].爆炸与冲击,2021,41(6):119-129.  
YE Zhiwei,CHEN Ming,LI Tong, et al. A calculation method of the peak pressure on borehole wall for low decoupling coefficient charge blasting[J]. Explosion and Shock Waves,2021,41(6):119-129.
- [12] 张召冉,陈华义,矫伟刚,等.含空孔直眼掏槽空孔效应及爆破参数研究[J].煤炭学报,2020,45(增2):791-800.  
ZHANG Zhaoran,CHEN Huayi,JIAO Weigang, et al. Rock breaking mechanism and blasting parameters of straight-hole cutting with empty-hole[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(S2):791-800.
- [13] 段宝福,侯亚洪,张正欣,等.岩巷掘进中角柱形掏槽孔合理间距的分析与应用[J].工程爆破,2023,29(4):69-77.  
DUAN Baofu,HOU Yahong,ZHANG Zhengxin, et al. Analysis and application of reasonable spacing of corner column cut holes in rock roadway excavation[J]. Engineering Blasting,2023,29(4):69-77.
- [14] 戴俊,李传净,陈哲浩,等.光面爆破相邻炮孔裂纹扩展模拟[J].科学技术与工程,2017,17(18):193-197.  
DAI Jun,LI Chuanjing,CHEN Zhehao, et al. Simulation of crack growth in adjacent blasting holes of smooth blasting[J]. Science, Technology and Engineering,2017,17(18):193-197.
- [15] ROSSMANITH H P,DAEHNKE A,NASMILLNER R E K, et al. Fracture mechanics applications to drilling and blasting [J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures,1997,20(11):1617-1636.
- [16] 张宪堂,马力,余辉,等.空孔直径对有围压直眼掏槽爆破破碎效果的影响[J].煤炭科学技术,2023,51(17):55-64.  
ZHANG Xiantang,MA Li,YU Hui, et al. Influence of diameter of empty hole on the fragmentation effect of parallel cut blasting under confining pressure[J]. Coal Science and Technology,2023,51(17):55-64.
- [17] 张宪堂,董国庆,余辉,等.围压下空孔直径对直眼掏槽爆破振动的影响[J].山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(3):44-52.  
ZHANG Xiantang,DONG Guoqing,YU Hui, et al. Influence of empty hole diameters on blasting vibration of parallel cut under confining pressure[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2023,42(3):44-52.
- [18] 皇新宇,纪强,张宪堂,等.地应力作用下四孔掏槽爆破破岩机理数值模拟研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2022,41(2):60-69.  
HUANG Xinyu,JI Qiang,ZHANG Xiantang, et al. Numerical simulation research on rock breaking mechanism of four-hole cut blasting under ground stress[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2022,41(2):60-69.

(责任编辑:吕海亮)