

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.016

## 巷道掘进药卷与钻孔直径匹配关系 对爆破破裂范围的影响<sup>\*</sup>

王姚姚<sup>1</sup>,汪海波<sup>1</sup>,程兵<sup>1</sup>,宗琦<sup>1</sup>,谢平<sup>2</sup>,王梦想<sup>1</sup>

(1.安徽理工大学 土木建筑学院,淮南 232001;2.淮南矿业(集团)有限责任公司 顾北煤矿,淮南 232001)

**摘要:** 为了研究炮孔不同耦合系数时的爆破效果,以满足现有煤矿岩巷掘进高效破岩的需要。通过对岩石的爆炸粉碎区和裂隙区范围进行探究,并且利用非线性动力模拟软件,模拟了在孔径 32 mm、35 mm、42 mm 情况下分别装入可装入的直径 27 mm、29 mm、35 mm、42 mm 药卷工况时的爆破效果,得到不同耦合系数装药的爆破过程和距炮孔中心不同位置的有效应力峰值;对不同时点岩石各个位置受到的有效应力峰值以及之后应力变化进行可视化表达;以及将各种情况下同一点所受到的峰值应力进行比对。结果表明:随着至炮孔中心距离的增大,应力峰值迅速衰减,且耦合装药无论在近处还是远处,其有效应力峰值的衰减程度均小于不耦合装药;耦合装药周边岩体受到的有效应力远远大于不耦合装药,且炮孔直径越大,有效应力峰值越大;耦合装药较之不耦合装药,有效应力峰值衰减相对较慢;不耦合系数相比较于炸药直径对有效应力峰值影响更大。且通过得到的裂隙圈半径,对单位炸药威力进行量化计算比对,得到采用 42 mm 炮孔耦合装药时,模拟单位炸药威力为 447.02 mm<sup>2</sup>,更加适合施工现场采用。

**关键词:** 硬岩巷道;耦合装药;数值模拟;应力峰值

中图分类号: TD235

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2022)02-0107-07

## Influence of Matching Relationship between Explosive Cartridge and Borehole Diameter in Roadway Excavation on Blasting Rupture Range

WANG Yao-yao<sup>1</sup>, WANG Hai-bo<sup>1</sup>, CHENG Bing<sup>1</sup>, ZONG Qi<sup>1</sup>, XIE Ping<sup>2</sup>, WANG Meng-xiang<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Gubei Coal Mine, Huainan Mining Industry(Group) Co., Ltd., Huainan 232001, China)

**Abstract:** Studying the blasting effect with different coupling coefficient of blast hole can meet the needs of high-efficient rock-breaking in existing coal mine roadway driving. By exploring the extent of the rock's explosive and fracture zone, the blasting effect is simulated under the hole diameter of 32 mm, 35 mm, 42 mm with the explosive cartridge diameter of respectively 27 mm, 29 mm, 35 mm and 42 mm using the nonlinear dynamic simulation software. Meanwhile, the blasting process of charge with different coupling coefficients and the effective stress peaks at different positions away from the hole center are obtained. The effective stress peaks and subsequent stress changes of rock at different time points are visualized, and the peak stresses at the same point under various conditions are compared. The results show that the stress peak decreases rapidly with the increase of the distance from the hole center, and the attenuation degree of the peak effective stress peak of the coupled charge is smaller than that of the uncoupled charge at both near and far. The effective stress of rock mass around coupled charge is much larger than that of uncoupled charge, and the peak value of effective stress increases with the diameter of borehole. The effective stress peak attenuation of coupled charge is slower than that of uncoupled charge. The uncoupling coefficient has a greater effect on the

effective stress peak than the explosive diameter. And through the obtained radius of crack circle, the power of unit explosive is quantitatively calculated and compared, and the simulated power of unit explosive is  $447.02 \text{ mm}^2$  when 42 mm hole coupling charge is adopted, which is more suitable for the construction site.

**Key words:** hard rock roadway; coupling charge; numerical simulation; peak stress

不耦合装药结构因其空气间隔的存在,可以降低岩体爆炸冲击波的作用强度、延长爆生气体作用时间,主要用于光面爆破和预裂爆破等<sup>[1-4]</sup>;耦合装药结构可更好地利用炸药爆炸应力波进行破岩,用于深孔爆破增透和硬岩巷道掘进等方面<sup>[5-6]</sup>。程兵通过 LS-DYNA 模拟软件分析不同耦合系数炮孔周边裂纹分布状况<sup>[7]</sup>,推断出不耦合侧岩体中应力峰值不仅小于耦合侧,且出现的时间也滞后于耦合侧;宗琦推导出了冲击波作用的压坏区和裂隙区扩展半径公式<sup>[8]</sup>;戴俊利用 Mises 强度准则并考虑岩石三向受力及其强度的应变率效应<sup>[9]</sup>,推导出柱状药包爆炸在岩石中引起的压碎圈与裂隙圈半径的计算式。龚敏对松软煤层深孔爆破的力学性能进行了研究<sup>[10]</sup>。

在煤矿巷道掘进实际工程中,钻孔直径主要有 32 mm、35 mm、42 mm,炸药药卷直径有 27 mm、29 mm、32 mm、35 mm。具体采用哪种组合,取决于现场施工人员习惯。基于现有研究成果,利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立爆破计算模型,得到不同孔径和药卷直径组合时模型体内的有效应力,分析了不同组合工况爆破应力波传播过程和爆破效果的影响,为岩巷硬岩爆破掘进提供理论依据。

## 1 耦合装药破岩理论计算

### 1.1 岩石损伤准则

爆轰冲击波的强压缩导致粉碎区的形成,消耗了部分的能量,使冲击波迅速衰减成应力波向岩体四周传播,进而形成裂隙区。此情况可以简化为平面应变问题,则岩石中任意一点所受到的应力可以表示为<sup>[11]</sup>

$$\begin{cases} \sigma_r = pr^{-a} \\ \sigma_\theta = -b\sigma_r \\ \sigma_z = v_d(1-b)\sigma_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$  和  $\sigma_z$  分别为径向应力、切向应力

和轴向应力; $\bar{r}$  为相对距离,且  $\bar{r} = r/r_b$ ,  $r$  为岩体中一点距炮孔中心的距离,  $r_b$  为炮孔半径;  $a$  为岩体中应力衰减系数,与泊松比的关系为  $a = 2 \pm \frac{v_d}{1-v_d}$  取正号是冲击波区衰减系数,取负号是应力波区衰减系数;

$b$  为测压系数,且  $b = \frac{v_d}{1-v_d}$ ,  $v_d$  为岩石的动态泊松比且  $v_d = 0.8v$ ,  $v$  为岩石的静态泊松比。

岩体的损伤准则主要由岩体的性质和其实质受力条件决定,在爆破荷载中,炮孔周边岩体受到压缩、剪切和拉伸三向应力状态,因此岩体中任意一点的受力状态为<sup>[8]</sup>

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

将式(1)代入,得

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_r [(1+b)^2 - 2v_d(1-v_d)(1-b)^2 + (1+b^2)]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

根据岩石损伤准则和 Mises 准则,岩石的损伤可以表示为:在压碎区  $\sigma_i = \sigma_{cd}$ ;在裂隙区  $\sigma_i = \sigma_{td}$ 。其中,  $\sigma_{cd}$  和  $\sigma_{td}$  分别为岩石的动态抗压强度和动态抗拉强度。

相比较静态荷载,岩石材料对爆炸产生的荷载更加敏感。一般情况下,岩体的动态抗拉强度是随着应变速率得增大而增大,根据已有研究,由于不同得岩石材料对应变速率得敏感度不同,因此对于常见的岩石材料,可以近似表示岩石的动态抗拉强度和抗压强度为<sup>[12]</sup>

$$\begin{cases} \sigma_{cd} = \sigma_c \dot{\epsilon}^{\frac{1}{3}} \\ \sigma_{td} = \sigma_t \dot{\epsilon}^{\frac{1}{3}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\sigma_c$  和  $\sigma_t$  分别为岩石的单轴静态抗压和抗拉强度; $\dot{\epsilon}$  为应变率;在粉碎区内加载率较高取  $\dot{\epsilon} = 10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ ,在裂隙区取  $\dot{\epsilon} = 1 \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 。根据已有研究<sup>[13]</sup>,在粉碎区可取  $\dot{\epsilon}^{\frac{1}{3}} = 5$ ,裂隙区可取  $\dot{\epsilon}^{\frac{1}{3}} = 3$ 。

### 1.2 岩石粉碎区和裂隙区的计算

爆炸裂隙区半径计算常用的公式为<sup>[14]</sup>

$$r_t = r_b \left( \frac{\lambda P_r}{S_t} \right)^{\frac{1}{a}} \quad (5)$$

收稿日期:2022-01-25

作者简介:王姚姚(1992-),男,硕士研究生,主要从事爆破与冲击动力学方面的研究,(E-mail)1546450598t@qq.com。

通讯作者:汪海波(1983-),男,博士、教授,主要从事爆破与冲击动力学、地下工程方面的研究,(E-mail)wanghb\_aust@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(52074009、51404010);安徽省高校自然科学研究重大项目(KJ2017ZD11)

式中:  $r_t$  为裂隙区半径;  $r_b$  为炮孔半径;  $P_r$  为炮孔壁初始压力;  $S_t$  为岩石的抗拉强度。

其中, 炮孔壁初始压力

$$P_t = \frac{1}{8} \rho_0 D^2 \left( \frac{d_c}{r_b} \right)^6 \lambda \quad (6)$$

式中:  $\rho_0$  为炸药密度;  $D$  为炸药爆速;  $d_c$  为炸药半径;  $\lambda$  为测压系数, 取  $\lambda = 8$ 。

文献[15]研究表明, 炸药的爆速与药卷直径有关, 研究的结果见表1。

表1 不同直径炸药的爆速<sup>[15]</sup>  
Table 1 Detonation velocity of different diameters explosives<sup>[15]</sup>

| 炸药直径 $d/\text{mm}$                    | 27   | 29   | 32   | 35   | 42   |
|---------------------------------------|------|------|------|------|------|
| 爆速 $D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | 3175 | 3186 | 3257 | 3425 | 3665 |

为保证粉碎区和裂隙区数据的合理有效, 计算以某巷道掘进为背景, 该巷道岩石的物理力学性能测试结果平均值为: 抗压强度 92.15 MPa, 抗压强度 4.90 MPa, 弹性模量 68.14 GPa, 泊松比 0.234。

## 2 计算模型与参数

现场爆破作业主要采用柱状装药, 且炮孔直径远远小于其炮孔长度, 所以在不考虑炸药端部的影响, 将

其做单层网格进行模拟<sup>[16]</sup>。研究使用 ANSYS/LS-DYNA 动力有限元软件建立尺寸为  $150 \text{ cm} \times 150 \text{ cm} \times 0.25 \text{ cm}$  的 1/4 爆破模型, 其中: 炮孔直径为 32 mm 时, 炸药直径分别为 27 mm、29 mm 和 32 mm; 炮孔直径为 35 mm 时, 炸药直径分别为 27 mm、29 mm 和 35 mm; 炮孔直径为 42 mm 时, 炸药直径分别为 27 mm、29 mm、35 mm 和 42 mm。各个模型的起爆点设置在同一点, 通过 \* INITIAL\_DETONATION 关键字定义位置。模型主要由炸药、岩石和空气三部分组成, 其中岩石采用 LAGRANGE 网格建模; 炸药和空气采用 Euler 网格建模, 单元使用 ALE 算法, 并且利用关键字 \* CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID 函数实现将炸药、岩石和空气之间的耦合。

炸药采用 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 材料模型来模拟爆破过程, 爆轰产物的体积、压力和能量特性通过 JWL 状态方程进行描述<sup>[17,18]</sup>

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (7)$$

式中:  $p$  为方程确定的爆轰压力;  $A$ 、 $B$  为炸药常数;  $\omega$  表示压力与内能的变化比, 及格林爱森参数;  $R_1$ 、 $R_2$  为无量纲常数;  $V$  为爆轰产物的相对体积;  $E_0$  为爆轰的初始内能。炸药的材料参数见表2。

表2 炸药材料参数  
Table 2 Explosive material parameters

| $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | $CJ/\text{GPa}$ | $A/\text{GPa}$ | $B/\text{GPa}$ | $R_1$ | $R_2$ | $E_0/\text{GPa}$ | $\omega$ |
|----------------------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------|-------|------------------|----------|
| 1.1                                    | 9.9             | 211.4          | 0.182          | 4.2   | 0.9   | 4.19             | 0.15     |

空气采用 LS-DYNA 中的材料模型 \* MAT\_NuLL, 其状态方程采用 \* EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 定义, 表达式为<sup>[19]</sup>

$$p = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E \quad (8)$$

式中:  $p$  为爆轰压力;  $C_0 \sim C_6$  为常数;  $V$  是相对体积;  $E$  为单位体积的内能。材料参数见表3。

表3 空气材料参数  
Table 3 Air material parameters

| 密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$ | $C_0$ | $C_1$ | $C_2$ | $C_3$ | $C_4$ | $C_5$ | $C_6$ | $V_0$ | $E_0/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-3})$ |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------------------------|
| 1.29                                  | 0.1   | 0     | 0     | 0     | 0.4   | 0.4   | 0     | 1     | $2.5 \times 10^5$                     |

考虑到岩石为脆性材料、具有各向异性性质的弹塑性体。采用 \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 作为岩石材料弹塑性模型。岩石材料模型参数采用前述测试结果。

## 3 模拟结果及其数据分析

### 3.1 岩体中应力波的传播

将 LS-DYNA Solver 求解出来的结果, 利用后处理软件 LS-Prepost 中的映射功能将 1/4 模型映射成

整体模型, 更加有助于观察单孔爆破有效应力波在岩体内的传播和衰减。得到典型时刻有效应力云图如图1所示。

由图1, 炸药爆炸后应力波在岩体内迅速向四周扩散, 造成岩体破碎。伴随冲击波向裂隙区的传播, 应力波峰值压缩的岩体会向应力波传播的反向产生拉应力, 进而岩体受拉产生裂隙。

### 3.2 不同耦合系数有效应力波分析

选取距炮孔中心 10 cm、20 cm、35 cm、50 cm、

70 cm、90 cm 的单元,记为 A ~ F,分析不同条件下岩体内的有效应力波分布规律。通过 LS-PREPOST 后处理测出其相关数据,可以得到各点应力随时间

变化曲线图,并且可以很直观看出各点受到的峰值应力,以及衰减变化历程,如图 2 所示(图 2 中各分图标题中  $k$  为不耦合系数)。

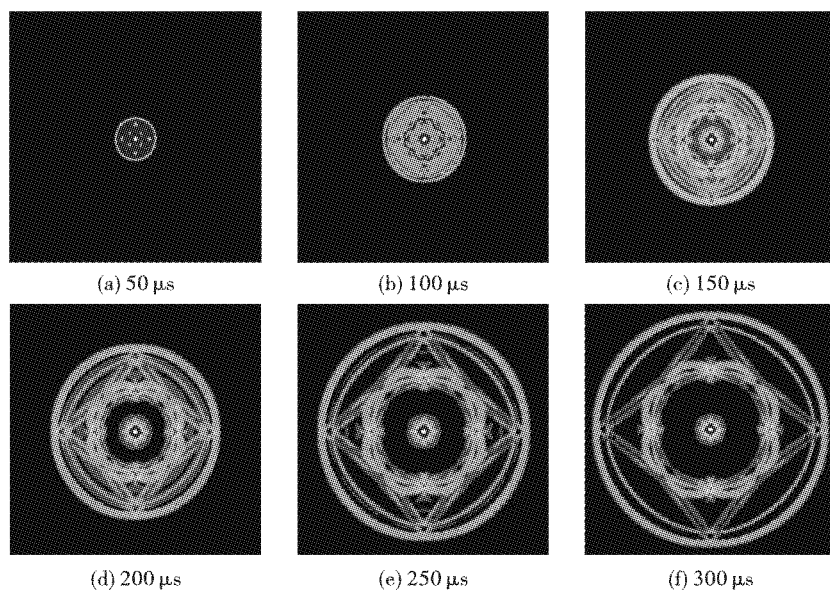


图 1 42 mm 单孔耦合装药不同时刻有效应力云图

Fig. 1 Effective stress nephogram of 42 mm coupled charge

通过图 2 可以看出,在爆炸初期岩石受到炸药的爆轰作用,岩石受到的有效应力急剧增加达到峰值。随着炸药爆轰过程的进行,炸药释放的能量不断被消耗,岩石受到的有效应力不断减小。从图中可以看出炸药起爆后,距离炮孔中心最近的单元 A、B 其受到的有效应力急剧上升并率先达到峰值,较远的单元 E、F 随后相继达到峰值并且增长速度相较于 A、B 单元缓慢,应力波动幅度亦小于 A、B 单元,很明显炸药爆炸对距离炮孔中心越近的影响越大。

进一步得到不同条件下岩体内的有效应力峰值随距离的衰减关系,如图 3 所示。

结合图 2 和图 3 可以得出:

1) 随着至炮孔中心距离的增大,应力峰值迅速衰减,且耦合装药无论在近处还是远处,其有效应力峰值的衰减程度均小于不耦合装药。这是因为不耦合装药时,空气间隔和药卷直径变小带来的装药量减小,直接降低了孔壁上的冲击压力。

2) 同孔径条件下,耦合装药所达到的应力峰值远大于不耦合装药。以孔径 35 mm 为例,耦合装药时 10 cm 处的有效应力峰值为 60.8 MPa,分别是炸药直径为 29 mm、27 mm 的 1.67 倍、1.91 倍;在 70 cm 处,耦合装药的有效应力峰值为 14.1 MPa,分别是炸药直径为 29 mm、27 mm 的 1.96 倍、2.47 倍。当孔径为 42 mm 时,耦合装药 10 cm 处的有效应力峰值为 76.3 MPa,分别是炸药直径 35 mm、29 mm、27 mm 的有效应力峰值的 1.62 倍、2.45 倍和

3.53 倍;70 cm 处,耦合装药的有效应力峰值为 18 MPa,分别是炸药直径 35 mm、29 mm、27 mm 的有效应力峰值的 2.07 倍、4.5 倍、6.4 倍。

3) 不耦合系数越小,在距中心不同位置所达到的有效应力峰值越大。从图 3 中可以看出,随着不耦合系数的增加,各监测点的有效应力峰值均减少。结合图 2b)、e)、h),炸药直径为 29 mm 时,孔径为 32 mm 在 10 cm 处的有效应力峰值为 41.6 MPa,较之孔径为 35 mm 在 10 cm 处的有效应力峰值减少 12.5%,较之孔径为 42 mm 在 10 cm 处的有效应力峰值减少 25.2%。此外,不耦合系数为 1.19 和 1.21、1.1 和 1.2 两条曲线表明不耦合系数相近时,装药直径对有效应力峰值影响不大。

通过上文岩石损伤准则,代入公式(4)计算得到应力波达到 14.7 MPa 就会产生裂隙,所以在图 3 中添加了  $y = 14.7$  MPa 的参照线,利用数据读取器得到各裂隙区边界;同时根据实测岩石力学性质,由公式(5)计算得到粉碎区和裂隙区的范围,得到表 4 和图 4。

由表 4 和图 4,理论计算和模拟得到的裂隙圈半径之间的误差基本在 11% 以内。通过图 4 可以看出:裂隙圈小的时候,理论值与模拟值基本一致,误差很小;而在裂隙圈较大时,理论值与模拟值相差较大;但其误差与理论值的占比基本一致。考虑到现场施工的经济性要求,根据理论计算和模拟出来的裂隙圈范围,利用公式裂隙圈面积除以炸药切面积,可以得到单位炸药的威力,上文已经得到耦合装药爆破效果比

不耦合装药好很多,所以在此只考虑三种耦合装药的效果,经计算得炸药直径为32 mm、35 mm和42 mm的理论单位炸药( $\text{mm}^2$ )威力为285.82  $\text{mm}^2$ 、

310.76  $\text{mm}^2$ 和369.19  $\text{mm}^2$ ,模拟单位炸药威力为349.22  $\text{mm}^2$ 、363.17  $\text{mm}^2$ 和447.02  $\text{mm}^2$ 。所以现场施工采用42 mm耦合装药爆破更优。

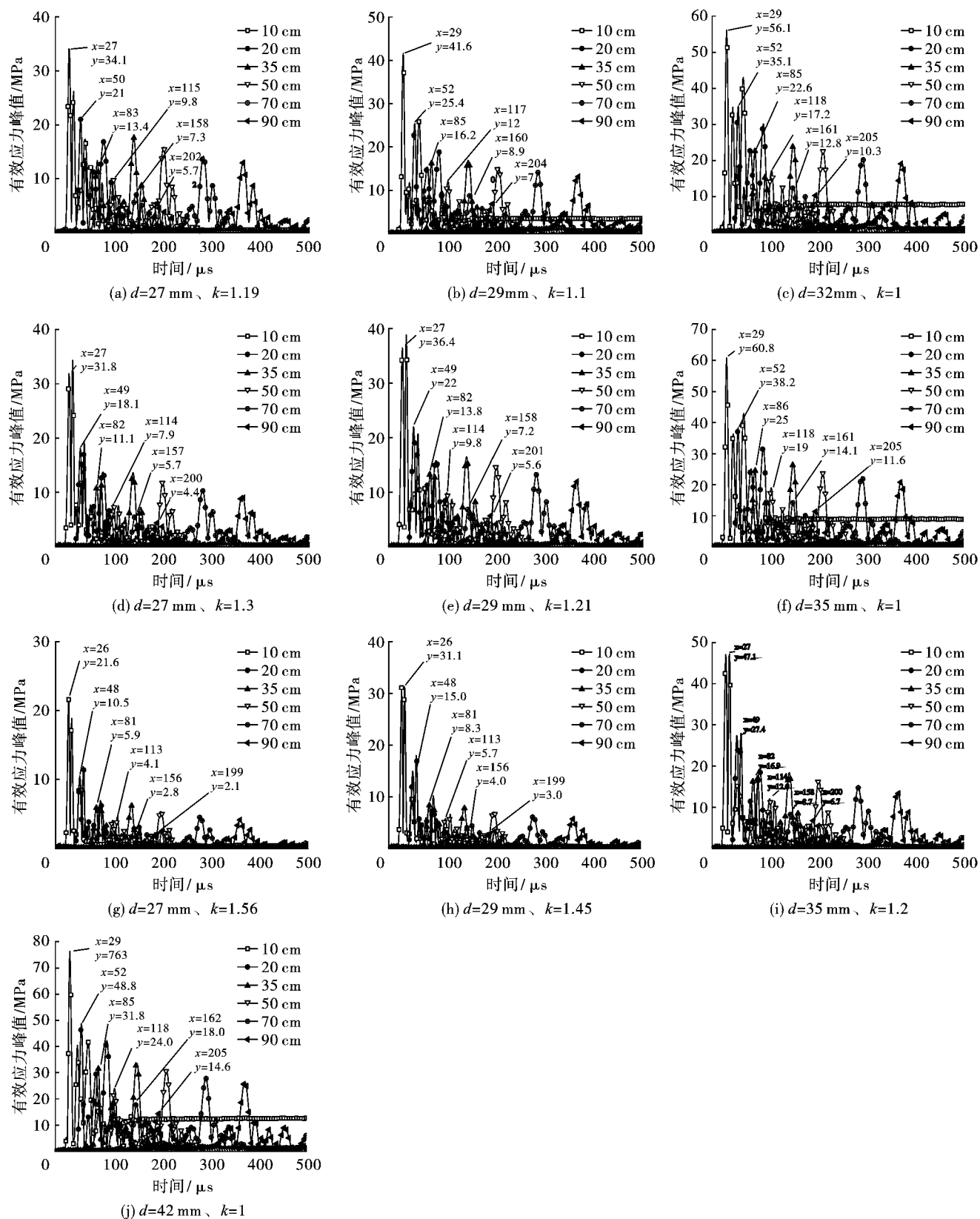


图2 不同单元处的应力时程曲线

Fig. 2 Element stress-time curves

表 4 不同装药直径破坏范围

Table 4 Failure range of different charge diameters

| 炸药直径/<br>mm | 炮孔直径/<br>mm | 不耦合系数 | 裂隙区半径/m |       | 误差/% |
|-------------|-------------|-------|---------|-------|------|
|             |             |       | 计算值     | 模拟值   |      |
| 27          | 32          | 1.19  | 0.286   | 0.304 | 6.3  |
| 27          | 35          | 1.30  | 0.225   | 0.243 | 7.4  |
| 27          | 42          | 1.56  | 0.142   | 0.157 | 10.5 |
| 29          | 32          | 1.10  | 0.370   | 0.400 | 8.1  |
| 29          | 35          | 1.21  | 0.291   | 0.319 | 9.6  |
| 29          | 42          | 1.45  | 0.183   | 0.203 | 10.9 |
| 32          | 32          | 1.00  | 0.541   | 0.598 | 10.5 |
| 35          | 35          | 1.00  | 0.617   | 0.667 | 8.1  |
| 35          | 42          | 1.20  | 0.388   | 0.414 | 6.7  |
| 42          | 42          | 1.00  | 0.807   | 0.888 | 10.0 |

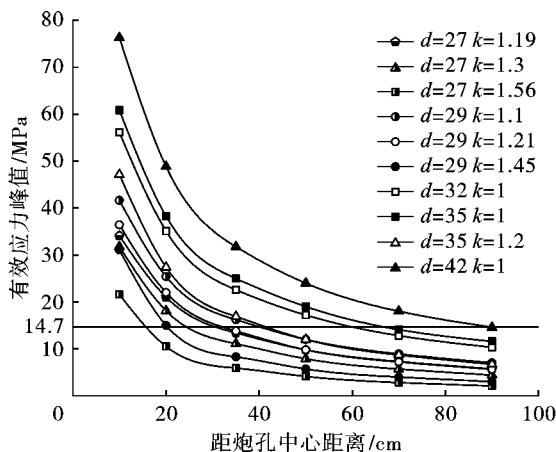


图 3 不同位置处的有效应力峰值与距炮孔中心距离的关系

Fig. 3 Relationship between peak stress and distance

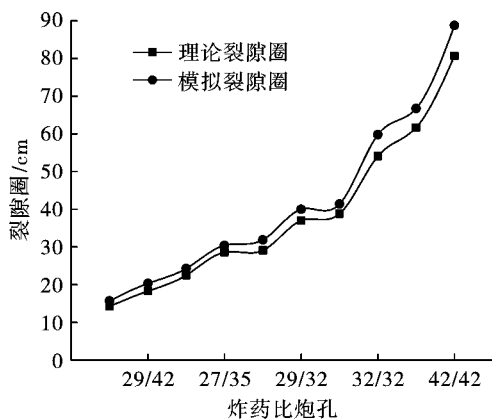


图 4 裂隙区半径模拟值与理论计算对比

Fig. 4 Comparison between simulation and theoretical fracture circles

## 4 结论

- (1) 耦合装药同一点的有效应力峰值大幅度大于不耦合装药, 且岩石破坏范围也大于不耦合装药。
- (2) 随着距离炮孔中心的增大, 有效应力波的

峰值衰减逐渐变缓。

(3) 不耦合系数越小, 固定点的有效应力峰值越大, 且不耦合系数对爆破范围的影响较之装药半径影响更大, 因此可以通过调节不耦合系数节省炸药。

(4) 模拟出来的破坏范围略大于理论计算的岩石破坏的范围, 但基本吻合。且在 42mm 耦合装药爆破效果最佳。

## 参考文献 (References)

- [1] 马元磊, 贺 鹏. 光面爆破技术在过断层巷道掘进的研究与应用[J]. 爆破, 2020, 37(4): 59-62, 165.
- [1] MA Yuan-lei, HE Peng. Research and application of smooth blasting technology in roadway excavation through fault[J]. Blasting, 2020, 37(4): 59-62, 165. (in Chinese)
- [2] 杨仁树, 肖成龙, 李永亮, 等. 不耦合偏心装药结构爆破损伤破坏的分形研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(12): 129-134.
- [2] YANG Ren-shu, XIAO Cheng-long, LI Yong-liang, et al. Fractal study on blasting damage of uncoupled eccentric charge structure[J]. Vibration and Shock, 2020, 39(12): 129-134. (in Chinese)
- [3] 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.
- [3] LI Xin-ping, CHEN Ping-ping, LUO Yi, et al. Impacts of asymmetric decoupling charge structure on presplitting blasting effect[J]. Blasting, 2017, 34(3): 25-30. (in Chinese)
- [4] 蔡 峰, 刘泽功. 耦合装药特性对深孔预裂爆破应力波能量衰减的影响[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S2): 384-389.
- [4] CAI Feng, LIU Zi-gong. Effect of coupling charge characteristics on energy attenuation of stress wave in deep hole

- presplitting blasting[J]. Journal of China Coal Society, 2014,39(S2):384-389. (in Chinese)
- [5] 曹有勋,马衍坤,毛小艺,等. 松软煤层多孔爆破的裂纹分布及区域电阻率响应实验研究[J]. 中国安全生产科学技术,2020,16(10):71-77.
- [5] CAO You-xun, MA Yan-kun, MAO Xiao-yi, et al. Experimental study on crack distribution and regional resistivity response of porous blasting in soft coal [J]. Science and Technology for Work Safety in China, 2020, 16(10): 71-77. (in Chinese)
- [6] YANG Jun-xiong, SHI Chong, YANG Wen-kun, et al. Numerical simulation of column charge explosive in rock masses with particle flow code [J]. Granular Matter, 2019, 21(4): 1-17.
- [7] 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.
- [7] CHENG Bing, WANG Hai-bo, WANG Meng-xiang, et al. Numerical simulation of blasting effect of eccentric decoupled charge in Borehole [J]. Science and Technology for Work Safety in China, 2018, 14(7): 40-47. (in Chinese)
- [8] 宗琦. 岩石内爆炸应力波破裂区半径的计算[J]. 爆破, 1994, 11(2): 15-17.
- [8] ZONG Qi. Calculation of the radius of Stress Wave Rupture Zone in rock explosion [J]. Blasting, 1994, 11(2): 15-17. (in Chinese)
- [9] 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(自然科学版), 2001(2): 144-147.
- [9] DAI Jun. Calculation of rock crushing ring and fissure ring in cylindrical charge blasting [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2001(2): 144-147. (in Chinese)
- [10] 龚敏,黄毅华,王德胜,等. 松软煤层深孔预裂爆破力学特性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(8): 1674-1681.
- [10] GONG Min, HUANG Yi-hua, WANG De-sheng, et al. Numerical analysis of mechanical characteristics of deep hole pre-splitting blasting in soft coal seam [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(8): 1674-1681. (in Chinese)
- [11] 吴亮,卢文波,宗琦. 岩石中柱状装药爆炸能量分布[J]. 岩土力学, 2006(5): 735-739.
- [11] WU Liang, LU Wen-bo, ZONG qi, et al. Distribution of explosive energy consumed by column charge in rock [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006(5): 735-739. (in Chinese)
- [12] 宫凤强,陆道辉,李夕兵,等. 不同应变率下砂岩动态强度准则的试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(9): 2433-2441.
- [12] GONG Feng-qiang, LU Dao-hui, LI Xi-bing, et al. Experimental research of sandstone dynamic strength criterion under different strain rates [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(9): 2433-2441. (in Chinese)
- [13] WANG Zhong-kang, GU Xiao-wei, ZHANG Wen-long, et al. Analysis of the cavity formation mechanism of wedge cut blasting in hard rock [J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(2): 1-10
- [14] 宗琦,马亚东,汪海波. 煤矿硬岩巷道掘进大直径炮孔爆破试验研究[J]. 爆破, 2017, 34(1): 47-51.
- [14] ZONG Qi, MA Ya-dong, WANG Hai-bo, et al. Experimental study on large diameter blast hole in hard rock roadway driving in coal mine [J]. Blasting, 2017, 34(1): 47-51. (in Chinese)
- [15] 刘闯龙,陈士海,孙杰,等. 浅埋小净距隧道爆破损伤探测及数值模拟分析[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(11): 149-157. .
- [15] LIU Min-long, CHEN Shi-hai, SUN Jie, et al. Blasting damage detection and numerical simulation analysis of shallow tunnel with small spacing [J]. Explosion and Shock, 2021, 41(11): 149-157. (in Chinese)
- [16] 程兵,汪海波,宗琦. 基于SPH-FEM耦合法切缝药包爆破机理数值模拟[J]. 含能材料, 2020, 28(4): 300-307.
- [16] CHENG Bing, WANG Hai-bo, ZONG Qi. Numerical simulation of slotted charge blasting mechanism based on SPH-FEM coupling method [J]. Energetic materials, 2020, 28(4): 300-307. (in Chinese)
- [17] 吴超,周传波,路世伟,等. 柱状装药不同起爆方式的数值模拟研究[J]. 爆破, 2016, 33(2): 74-77, 91.
- [17] WU Chao, ZHOU Chuan-bo, LU Shi-wei, et al. Numerical simulation of different initiation modes of cylindrical charge [J]. Blasting, 2016, 33(2): 74-77, 91. (in Chinese)
- [18] 崔年生. 不耦合装药系数对预裂爆破效果影响的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(4): 10-13.
- [18] CUI Nian-sheng. Numerical simulation study on effect of decoupling charge coefficient on presplitting blasting effect [J]. Mining Research and Development, 2018, 38(4): 10-13. (in Chinese)
- [19] 宗琦,程兵,汪海波. 偏心不耦合装药孔壁压力与损伤效应数值模拟[J]. 爆破, 2019, 36(3): 76-83.
- [19] ZONG Qi, CHENG Bing, WANG Hai-bo. Numerical simulation of hole wall pressure and damage effect of eccentric decoupling charge [J]. Blasting, 2019, 36(3): 76-83. (in Chinese)