

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.06.009

中部空气间隔不同比例装药对炮孔孔壁受力及碎石块度的影响*

林继凯^① 孙梦迪^② 刘增辉^② 赵高明^② 王世伟^② 王凡繁^③

①山西长治经坊煤业有限公司(山西长治,047100)

②安徽理工大学矿业工程学院(安徽淮南,232001)

③芜湖海螺水泥有限公司(安徽芜湖,241200)

[摘要] 为分析装药中部不同空气间隔位置对炮孔孔壁受力的影响,以 Starfield 迭加法为基础,得出中部空气间隔装药爆破时整段孔壁上的冲击压力计算公式。在 ANSYS-DYNA 中建立多组不同中部空气间隔位置的计算模型,对孔壁及周围岩体的受力和损伤度进行分析。最后,进行现场爆破实验,使用 WipFrag 软件对碎石块度分布的变化规律进行分析。结果表明:中部空气间隔装药爆破时,孔壁压力整体呈现两端大、中间小的分布特征,装药段孔壁受到的冲击压力达到最大,冲击波以 8 字型向炮孔周围传播。当空气间隔位置在装药段中点时,上、下段药柱周围岩体受力大致相等,碎石块度相对均匀。因此,垂直台阶进行露天爆破开采时,为降低大块和粉料的产生率,空气柱上、下段可进行等比例装药,倾斜边坡可以适当向上调整空气间隔位置。

[关键词] 露天爆破;空气间隔装药;孔壁冲击压力;碎石块度

[分类号] TD235

Influence of Charge with Different Proportions under the Condition of Middle Air Separation on the Stress on the Borehole Wall and the Rock Fragmentation

LIN Jikai^①, SUN Mengdi^②, LIU Zenghui^②, ZHAO Gaoming^②, WANG Shiwei^②, WANG Fanfan^③

①Shanxi Changzhi Jingfang Coal Industry Co., Ltd. (Shanxi Changzhi, 047100)

②School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology (Anhui Huainan, 232001)

③Wuhu Conch Cement Co., Ltd. (Anhui Wuhu, 241200)

[ABSTRACT] In order to analyze the influence of different air column positions in the middle of the charge on the stress on borehole wall, based on the Starfield superposition method, the calculation formula for the impact pressure on the entire borehole wall during the middle air interval charging blasting was obtained. Multiple calculation models for different central air column positions were established using ANSYS-DYNA, and the stress and damage degree of the borehole wall and surrounding rock mass were analyzed. Finally, on-site blasting experiments were conducted, and the distribution and variation of the fragmentation were analyzed using WipFrag software. The results show that, during the middle air interval charging blasting, the overall pressure on borehole wall shows a large distribution at both ends and a small distribution in the middle. The impact pressure on the borehole wall in the charging section reaches its maximum, and the shock wave propagates around the hole in an 8-shaped pattern. When the air column position is at the midpoint of the charging section, the stress on the rock mass around the upper and lower sections of the charging column is roughly equal, and the block size is relatively uniform. Therefore, when the open-pit blasting mining is conducted on vertical benches, in order to reduce the production rate of large blocks and powder, the upper and lower sections of the air column can be charged in equal proportions, and the air column position can be appropriately adjusted upwards on inclined slopes.

[KEYWORDS] open-bit blasting; charge with air separation; shock pressure on borehole wall; rock fragmentation

* 收稿日期:2023-01-21

基金项目:国家自然科学基金(51974007,51874002)

第一作者:林继凯(1986-),男,硕士,高级工程师,主要从事采矿工程的研究。E-mail:516463703@qq.com

通信作者:刘增辉(1975-),男,博士,教授,主要从事采矿工程的研究。E-mail:953471093@qq.com

0 引言

在石灰岩骨料、机制砂爆破开采生产过程中,多使用连续耦合装药结构进行爆破开采,存在碎石块度大、粉矿率高等问题,增加了二次爆破成本,造成资源浪费^[1]。空气间隔装药能够提高装药高度,激发二次应力波,延长应力波的作用时间,缓慢、均匀地释放炸药爆炸能量,有效调节爆炸能量的分布,使炮孔孔壁受力更均匀^[2],也使爆破后的碎石粒径分布更均匀。

目前,针对爆破碎石粒径分布的问题,国内学者做了大量研究。炮孔孔壁受力方面:朱红兵等^[3]利用爆轰理论对空气间隔装药炮孔内的压力波传播过程进行分析,给出合理空气间隔长度的计算公式。楼晓明等^[4,5]利用 Starfield 迭代法给出孔壁初始冲击压力计算公式,对顶部、中部和底部空气间隔装药结构中孔壁受到的冲击压力进行分析,得出孔壁冲击压力分布规律。杨国梁等^[6]利用理论分析和数值模拟,研究炮孔受到的冲击压力,发现空气间隔装药时,装药段炮孔近区出现多个峰值,还能够增加冲击压力的作用时间。张馨等^[7]构建了耦合装药炮孔壁受力的简化计算模型,将炮孔爆破分为 4 个阶段,并提出了各个阶段的计算公式。叶志伟等^[8,9]考虑空气冲击波的传播与爆轰产物膨胀的过程,理论与实验相结合,分析了孔壁峰值压力的变化规律,提出了孔壁峰值应力的计算方法。

空气间隔对碎石块度的影响方面:谢烽等^[10]和刘庆等^[11]建立了空气间隔上、下段等比例装药结构,分析了不同空气间隔长度对碎石块度的影响。李顺波等^[12]分析研究了顶部空气间隔长度对碎石块度的影响,得出最佳的空气间隔长度。张晓平等^[13]利用 ANSYS/DYNA 软件,计算并分析了不同间隔长度和不同上、下段装药比例对岩石的破碎效果,得出有利于岩石破碎的装药结构。张袁娟等^[14]和张迎吉等^[15]利用 LS-DYNA 软件模拟了顶部、中部和底部空气间隔 3 种装药结构,分析了岩石受到的峰值应力,结合爆破现场碎石块度分布结果,得出中部间隔为最佳装药结构。虽然前人在空气间隔装药控制岩石的爆破块度方面取得了大量研究成果,但都以上、下等比例装药进行研究。

在利用空气间隔装药进行爆破时,冲击波与炮孔的作用十分复杂,而且上、下段药柱爆炸产生的冲击波会相互叠加,装药长度的不同,炮孔孔壁受到的冲击压力分布规律也会不同。上、下两部分的装药

量和装药长度对爆破效果的影响鲜见报道。

为此,在 Starfield 迭代法得到的孔壁压力计算公式基础上,针对空气间隔上、下段非等比例装药炮孔孔壁的受力问题,考虑冲击波在炮孔轴向上的衰减,推导出不同空气间隔位置时孔壁所受冲击压力的计算公式。运用 ANSYS-DYNA 有限元软件,模拟计算不同空气间隔位置时孔壁受到的冲击压力和岩体损伤变化规律。对计算公式进行验证,结合现场爆破碎石块度,得出空气间隔位置的选取原则,为现场实际爆破提供参考。

1 不同空气间隔位置岩石破碎理论

1.1 中部空气间隔孔壁初始冲击压力

使用 Starfield 迭代法可以有效计算深孔柱状药包爆炸时炮孔孔壁受到的初始冲击压力,且计算出的最大冲击压力与实际峰值应力相近^[4]。原理是,将柱状炸药视作有限多个半径相同的等效单元球形药包,如图 1 所示。图 1 中: l_e 为装药总长度; d_c 为炮孔的直径; d_e 为单元球形药包的等效直径。将这些有限多个球形药包爆炸后的冲击压力进行迭加,即可计算出炮孔孔壁上某一点处受到的初始冲击压力。

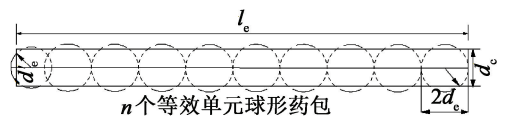


图 1 柱状炸药的等效球形单元

Fig. 1 Equivalent spherical element of the cylindrical explosive

当进行连续耦合装药时,利用 Starfield 迭代加法给出炮孔孔壁某一点处的峰值冲击压力^[16]

$$p = Ke^{-Ae} \left(\frac{l_e}{d_c} \right)^{-\beta} \quad (1)$$

其中:

$$t = \frac{2ir_e}{D} + \frac{l_i}{C_p}, (i = 1, 2, \dots, n); \quad (2)$$

$$A = \frac{C_p(1 - 2\mu)}{a(1 - \mu)k} \quad (3)$$

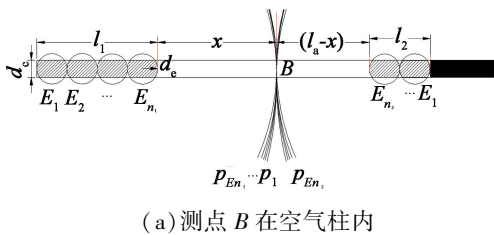
式中: K 为相应的系数; A 为等效单元球状药包爆破载荷衰减系数; C_p 为岩石纵波速度; a, k 为与岩石性质有关的常数; D 为炸药爆速; l_i 为第 i 个等效单元球状药包外切点到指定点的距离; β 为冲击压力在炮孔轴向上的衰减系数; r_e 为单元球形药包的等效半径; μ 为岩石应变率。

当采用中部空气间隔装药进行爆破时,空气柱

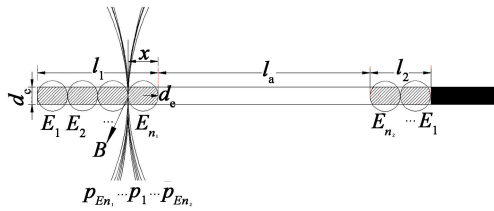
将药柱分隔为 I 段药柱和 II 段药柱。设空气间隔长度为 l_a , I 段装药长度为 l_1 , II 段装药长度为 l_2 , 则 $l_e = l_1 + l_2$ 。依据 Starfield 迭代加法的计算方法, 上段柱状药包可等效为 n_1 个单元球形药包, 下段药柱可以等效为 n_2 个单元球形药包。

$$\begin{cases} n_1 = \frac{\sqrt{6}l_1}{3d_c}; \\ n_2 = \frac{\sqrt{6}l_2}{3d_c}. \end{cases} \quad (4)$$

假设空气柱长为 l_a , 孔壁上任意一点 B 与 I 段药柱的右端点的距离为 x 。当 $0 < x < l_a$ 时, B 点在空气柱内, 则 B 点与 II 段药柱的左侧距离为 $l_a - x$, 见图 2(a)。



(a) 测点 B 在空气柱内



(b) 测点 B 在药柱内

图 2 中部空气间隔装药时孔壁的初始冲击压力

Fig. 2 Initial impact pressure on the borehole wall during the explosion with middle air separation charging

当 I 段药柱传爆到第 i 单元个球形药包 (从装药段顶部到底部, i 依次递增, $i \leq n_1$ 且 i 为正整数) 时, 空气柱上任意一点受到的冲击压力 p 随时间的变化:

$$p = Ke^{-At} \left(\frac{x + 2id_e}{d_c} \right)^{-\beta}. \quad (5)$$

同理, 当 II 段药柱传爆到第 j 单元个球形药包 ($j \leq n_2$ 且 j 为正整数) 时, 得到 II 段药柱等效球形药包产生的冲击压力在 B 点处的计算公式:

$$p = Ke^{-At} \left(\frac{l_a - x + 2jd_e}{d_c} \right)^{-\beta}. \quad (6)$$

上、下两段药柱在 B 点处产生的冲击压力可表示为所有等效单元球形药包在该点处产生的冲击压力矢量叠加^[4], 即

$$p = K \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} e^{-At} \left[\left(\frac{x + 2id_e}{d_c} \right)^{-\beta} + \left(\frac{l_a - x + 2jd_e}{d_c} \right)^{-\beta} \right]. \quad (7)$$

当 B 点在 I 段药柱内时, B 点到 I 段药柱右端点处的距离为 x , 如图 2(b) 所示。

依据 Starfield 迭代加法的计算方法, B 点左侧 I 段柱状药包可等效为 n_1 个单元球形药包; B 点右侧 I 段药柱可以等效为 n_2 个单元球形药包; II 段药柱可等效为 n_3 个单元球形药包。此时,

$$\begin{cases} n_1 = \frac{\sqrt{6}(l_1 - x)}{3d_c}; \\ n_2 = \frac{\sqrt{6}x}{3d_c}; \\ n_3 = \frac{\sqrt{6}l_2}{3d_c}. \end{cases} \quad (8)$$

受空气柱的影响, B 点处产生的冲击压力为 B 点左侧 I 段传爆到第 i ($0 < i < n_1$) 个单元球形药包, B 点右侧 I 段传爆到第 j ($0 < j < n_2$) 个单元球形药包, 和 II 段药柱传爆到第 y ($0 < y < n_3$) 个单元球形药包的矢量叠加。

$$p = K \sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} e^{-At} \left[\left(\frac{2id_e}{d_c} \right)^{-\beta} + \left(\frac{2jd_e}{d_c} \right)^{-\beta} \right] + K \sum_{y=1}^{n_3} \left[\frac{l_a + 2yd_e}{d_c} e^{-At} \right]^{-\beta}. \quad (9)$$

分析式(7)和式(9)的函数变化特征, 当中部空气间隔上、下段进行等比例装药时, 沿炮孔轴向方向, 冲击压力在上、下两个装药段内达到极大值, 炸药爆炸后冲击载荷在空气柱内衰减, 空气柱段内孔壁上冲击压力整体呈下凹型分布特征, 在装药段的两端孔壁冲击压力出现峰值, 峰值应力大小会随着装药长度的变化而发生变化。炮孔堵塞段没有装药, 所以堵塞段孔壁会受到的冲击压力相对较小, 可绘出孔壁受到的最大冲击压力 p_{\max} 随空气间隔位置的变化曲线, 如图 3 所示。

1.2 冲击波在岩石中的衰减

炮孔内的炸药被引爆后, 产生了大量的爆生气体和冲击压力作用于炮孔孔壁上, 引起炮孔周围岩体的压应力波从柱状药包两端向四周岩体传播。分析得知, 空气柱段孔壁受到的冲击压力相对较小, 应力场的分布规律如图 4 所示。图 4 中, 峰值应力等值线呈对称分布。波阵面在径向范围内是柱状的, 在两端部是半圆形的, 半圆圆心在端部中心处。冲击波的变化会直接影响爆破碎石块度的变化规律。冲击波的传播规律会随着空气柱位置的变化而发生变化, 空气柱两端进行等比例装药时, 炸药爆炸后冲击波在空气柱中点上、下呈对称式分布, 上、下段药柱周围的岩体受力大致相等。

炸药爆炸后, 冲击载荷作用在炮孔上, 传递到岩

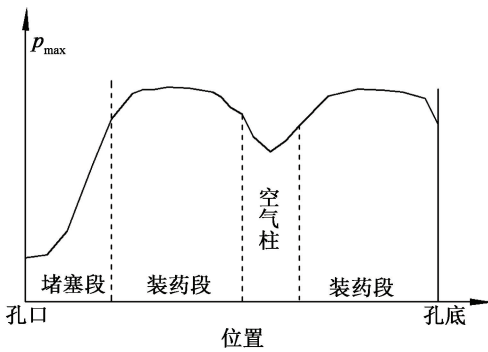


图 3 孔壁受到的初始位置冲击压力的变化趋势
Fig. 3 Variation trend of initial impact pressure on the borehole wall

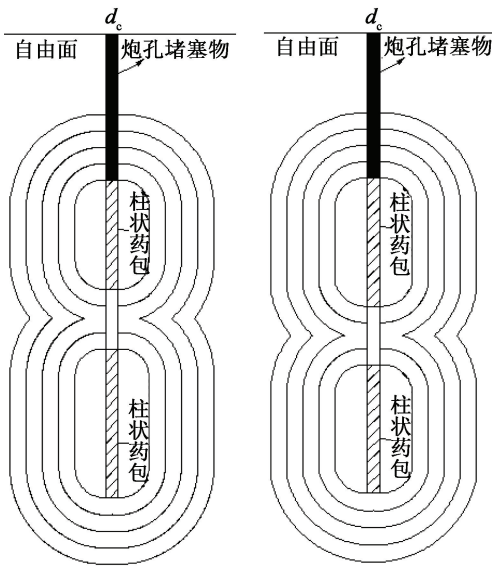


图 4 空气间隔装药应力场分布

Fig. 4 Stress distribution during the explosion with middle air separation charging

石内。爆炸应力波在岩石中传播时,岩石任意一点处的径向应力和切向应力遵循指数衰减的规律的表达式^[17]:

$$\begin{cases} \sigma_r = p \left(\frac{r}{r_c} \right)^{-\alpha}; \\ \sigma_\theta = -b\sigma_r; \\ b = \frac{\mu_d}{1 - \mu_d}. \end{cases} \quad (10)$$

式中: σ_r 为径向应力; σ_θ 为切向应力; r 为距药室中心的距离; r_c 为炮孔半径; b 为侧向压力系数; α 为压力衰减指数; μ_d 岩石动态泊松比。

1.3 岩石破碎机理

将岩石受到的应力等效成平面问题,则可进一步求得平面主应力^[18]

$$\sigma_z = (\sigma_r + \sigma_\theta)\mu_d = \mu_d(1 - b)\sigma_r. \quad (11)$$

岩石中任意一点的应力强度

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (12)$$

结合式(10)~式(12),可得出岩石任意一点处岩石受到的应力强度

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma_r [(1 + b)^2 - 2\mu_d(1 - \mu_d)(1 - b)^2 + (1 + b)^2]^{\frac{1}{2}}. \quad (13)$$

根据 Mises 准则,当岩石受到的应力满足式(8)时,岩石被破坏:

$$\sigma_i = \begin{cases} \sigma_{cd} \text{ (压碎圈);} \\ \sigma_{td} \text{ (裂隙圈).} \end{cases} \quad (14)$$

式中: σ_{cd} 岩石动态抗压强度; σ_{td} 为岩石动态抗拉强度。

2 装药结构的数值模拟分析

2.1 计算模型

建立三维计算模型。模型台阶高度为 17.0 m,超深 1.5 m。模型总高度为 18.5 m,宽度为 10.0 m。炮孔直径为 210 mm,装药高度为 12 m,空气柱长度为 1.0 m,炮孔堵塞长度为 5.5 m。采用 3D-Solid164 结构实体单元对空气、炸药、岩石和炮泥 4 种材料进行网格划分。模型中,网格划分尺寸为 0.02 m。

改变上、下段装药比例,以此改变空气柱的位置,分析岩石受到的应力和空气间隔位置对孔壁受力及应力波传播的影响。将模型上、下、左、右 4 个边设置为无反射边界条件,前表面和后表面设置为自由面,右边界和下边界施加 0.3 MPa 应力约束,计算时间为 5 000 μ s。在装药段,炮孔孔壁上每隔 0.5 m 设置一个测点;在空气柱段,测点进行加密处理,每隔 0.1 m 设置一个测点。对炮孔孔壁受到的初始冲击压力进行监测。在上、下段药柱的中心线上设置 5 个测点,相邻的两个测点的距离 0.5 m,这 5 个测点的位置会随着上段装药的长度发生变化,但始终在上、下段药柱的中点且处在同一条水平线。计算模型及测点的布置如图 5 所示。

2.2 模型材料

在计算模型中涉及 4 个材料:空气、岩石、炸药和炮孔堵塞物炮泥。炸药、空气和炮泥采用 ALE 流固耦合算法;岩石采用 Lagrange 算法。

2.2.1 岩石材料模型

岩石采用 Mat * RHT 模型进行描述,参数如表 1

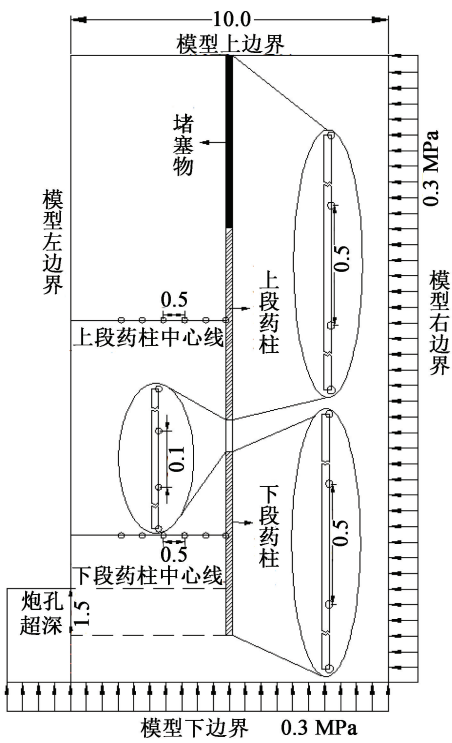


图5 计算模型(单位:m)

Fig. 5 Calculation model (Unit: m)

所示。表1中: R_0 为密度; T_s 剪切模量; A 为常数; B_0 、 B_1 、 D_1 、 D_2 、 N 、 T_1 为JWL方程中的EOS的系数; F_c 为岩石抗压强度; F_s^* 为岩石动态应变率; F_1^* 为

表1 岩石的RHT模型参数

Tab. 1 RHT model parameters of rocks

| $R_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | T_s/GPa | A | B_0 | B_1 | D_1 | N | F_c/MPa | F_s^* |
|---------------------------------------|------------------|---------|---------------------|---------------------|------------------|------------|------------------|---------------------|
| 2 660 | 24.17 | 1.6 | 1.68 | 1.68 | 0.04 | 0.6 | 32 | 0.38 |
| F_1^* | X_l | D_2 | E_T | E_{OT} | B_{ETAC} | B_{ETAT} | T_1/GPa | p_{cl}/GPa |
| 0.08 | 0.5 | 1.0 | 3×10^{-10} | 3×10^{-11} | 0.010 6 | 0.014 4 | 87.71 | 0.4 |
| p_{co}/GPa | G_C^* | G_T^* | A_1/GPa | A_2/GPa | A_3/GPa | | | |
| 6 | 0.4 | 0.7 | 86.7 | 145.7 | 89.0 | | | |

表2 炸药参数

Tab. 2 Explosive parameters

| $R_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | p_{CJ}/GPa | $D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$ | A | B | R_1 | R_2 | ω | E_0/GPa |
|---------------------------------------|---------------------|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|----------|------------------|
| 1 300 | 4.2 | 3 500 | 271.4 | 0.032 | 4.15 | 0.95 | 0.3 | 7 |

表3 空气参数

Tab. 3 Air parameters

| $R_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | E_0/GPa | C_0 | C_1 | C_2 | C_3 | C_4 | C_5 | C_6 |
|---------------------------------------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1.2 | 2.5×10^{-9} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.4 | 0.4 | 0 |

拉压比; X_l 为剪切模量折减系数; E_T 为断裂拉伸应变率; E_{OT} 为断裂压缩应变率; B_{ETAC} 为压缩应变率相关指数; B_{ETAT} 为拉伸应变率相关指数; p_{cl} 为粉碎压力; p_{co} 为压实压力; G_C^* 为压缩屈服面参数; G_T^* 为拉伸屈服面参数; A_1 、 A_2 、 A_3 为JWL方程中Hugohiot多项式参数。

2.2.2 炸药材料模型

使用混装铵油炸药进行爆破开采。在数值模拟软件LS-DYNA中,用*Mat_High_Explosive_Burn高能炸药模型及JWL状态方程加以描述,炸药参数如表2所示。表2中: p_{CJ} 为CJ面压力; D 为爆速; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 均为材料参数; E_0 为初始热力学能。

2.2.3 空气材料模型

空气在LS-DYNA中使用*Mat_Null材料模型及线性多项式状态方程*EOS_Linear_Polynomial加以描述。空气参数见表3。表3中, $C_0 \sim C_6$ 为系数。

2.2.4 炮泥材料模型

炮泥材料采用*Mat-Soil-and-Foam模型和*Initial_Volume_Fraction_Geometry状态方程进行描述,炮泥材料参数如表4所示。表4中: p_c 为拉伸破坏裁断压力; A_0 、 A_1 、 A_2 为屈服函数常数; $E_{SP1} \sim E_{SP10}$ 为特征体应变; $p_1 \sim p_{10}$ 为特征体应变对应的压力。

2.3 模拟计算方案

为探究最佳空气间隔位置,固定空气间隔长度

表 4 炮泥参数

Tab.4 Tamping plug parameters

| | | | | | | | | |
|---|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------------------|--------------------|
| $R_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ | p_c / GPa | A_0 | A_1 | A_2 | D_1 | E_{SP_1} | E_{SP_2} | E_{SP_3} |
| 1.8 | 2.0 | 1.6 | 1.68 | 1.68 | 0.04 | 0 | 0.104 | 0.161 |
| E_{SP_4} | E_{SP_5} | E_{SP_6} | E_{SP_7} | E_{SP_8} | E_{SP_9} | $E_{SP_{10}}$ | p_1 / GPa | p_2 / GPa |
| 0.192 | 0.224 | 0.246 | 0.271 | 0.283 | 0.29 | 0.4 | 0 | 0.000 2 |
| p_3 / GPa | p_4 / GPa | p_5 / GPa | p_6 / GPa | p_7 / GPa | p_8 / GPa | p_9 / GPa | p_{10} / GPa | |
| 0.000 4 | 0.000 6 | 0.001 2 | 0.002 0 | 0.004 0 | 0.006 0 | 0.008 0 | 0.041 0 | |

为 1 m, 不改变总装药量, 改变装药柱上、下比例, 上、下两段药柱同时起爆。具体实验方案见表 5。

表 5 不同空气柱位置方案

Tab.5 Schemes for different air column positions

| 编号 | 上、下段装药长度比例 | 上装药段长度/m | 下装药段长度/m |
|----------------|------------|----------|----------|
| 1 [#] | 2 : 8 | 2.4 | 9.6 |
| 2 [#] | 3 : 7 | 3.6 | 8.4 |
| 3 [#] | 4 : 6 | 4.8 | 7.2 |
| 4 [#] | 5 : 5 | 6.0 | 6.0 |
| 5 [#] | 6 : 4 | 7.2 | 4.8 |
| 6 [#] | 7 : 3 | 8.4 | 3.6 |

2.4 模拟计算结果

2.4.1 炮孔孔壁的受力

$t = 850 \mu\text{s}$ 时, RHT 岩石模型受到的冲击压力计算结果如图 6 所示。

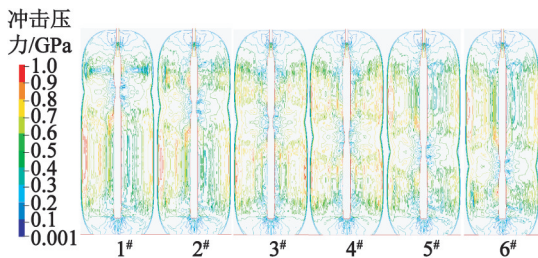


图 6 模型冲击压力等值线

Fig.6 Contour of impact pressure in the model

从图 6 中可以看出: 炸药爆炸后, 冲击波传播会随着空气间隔位置的变化而发生变化。炸药爆炸后, 空气柱上、下两段药柱产生的冲击波一部分压缩空气, 一部分作用在孔壁和堵塞物上, 并向四周传播。在装药段, 孔壁受到的冲击压力大于空气间隔段孔壁受到的冲击压力, 所以冲击波会在药柱两端以 8 字形向岩体四周传播。冲击波在空气间隔层中向炮孔孔壁传播, 由于岩石波阻抗远大于空气的波阻抗, 引起大量的反射作用, 改变冲击波的作用方向。冲击波的传播形态与理论分析结果基本一致。

提取 RHT 岩石计算模型中炮孔孔壁上测点受到的最大冲击压力, 变化曲线如图 7 所示。可以看出: 装药两端孔壁受到的冲击压力相对较小。进行空气间隔装药时, 沿炮孔轴向方向, 孔壁上出现了 2 个峰值冲击压力, 冲击压力在上、下装药段处达到最大值。变化规律与理论分析结果基本一致。受冲击压力矢量叠加的影响, 随着空气间隔位置的改变, 空气柱段内孔壁受到的峰值冲击压力先增大、后减小。当上、下段装药长度比为 4 : 6、5 : 5 和 6 : 4 时, 空气柱的位置接近炮孔装药段中心, 空气段孔壁受到的最大冲击压力几乎相等, 空气间隔位置在装药段两端时, 空气段孔壁受到的冲击压力相对较小。

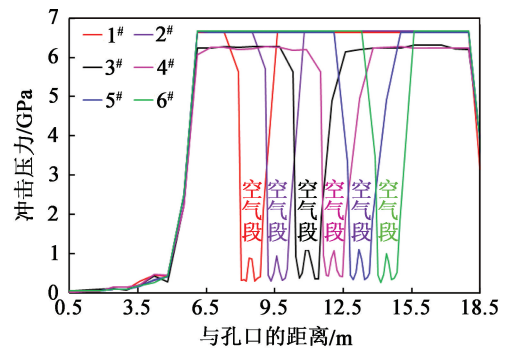


图 7 炮孔壁受到的冲击压力

Fig.7 Impact pressure on the borehole wall

2.4.2 炮孔周围岩体的受力

提取上、下装药段中心线上水平测点受到的最大冲击压力, 变化曲线如图 8 所示。空气间隔位置的变化能够改变炮孔周围岩体受到的冲击压力, 装药长度较大的那一段, 装药量较多, 炸药爆炸后产生的能量相对较高, 所以炮孔周围岩体受到的冲击压力相对较大。上、下段装药长度接近或相等时, 空气间隔位置在药柱中点, 上、下两段药柱周围岩体受到的冲击压力基本相等。

2.4.3 岩体的损伤

一定的载荷与环境的作用会使岩石力学性能的微结构发生变化, 这种微结构的变化达到一定程度

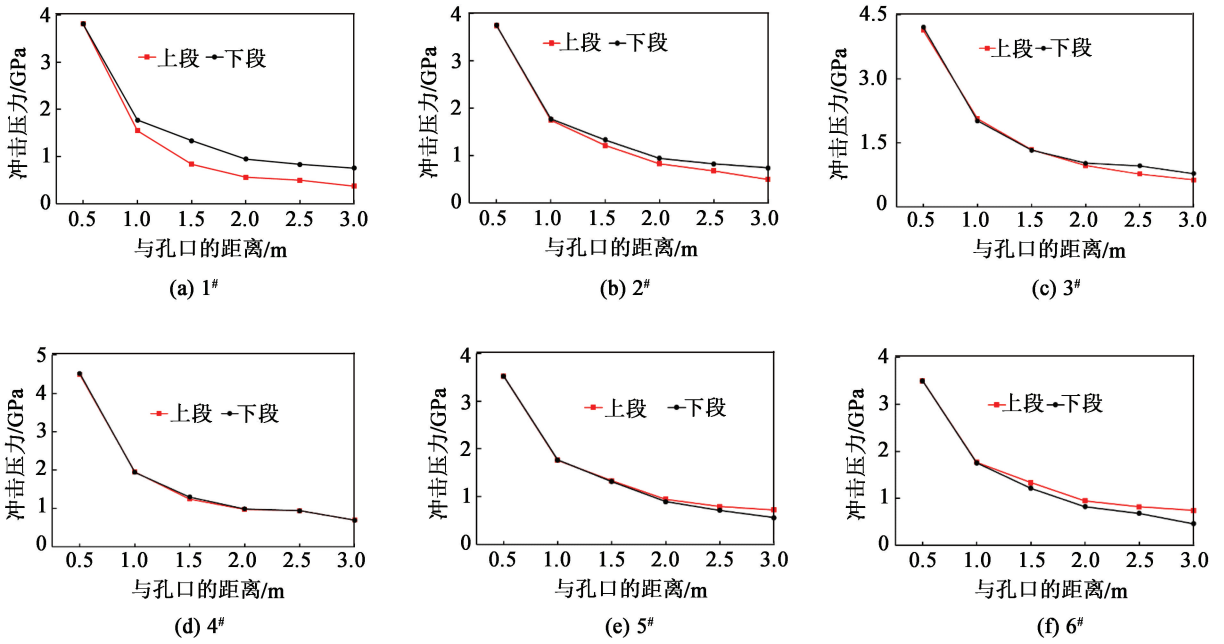


图 8 炮孔周围岩体的受力变化

Fig. 8 Stress variation of rock mass around the borehole

就会导致岩石损伤。

损伤度是损伤的岩石占岩石总体积的比重,在 DYNA 中就是贯穿裂隙在单位网格中的占比。当损伤度小于 30% 时,岩石没有产生宏观的贯通裂隙,较为完整,大块的产生率相对较高;当损伤度在 30%~80% 之间时,岩石被爆生裂隙分成若干个碎块,碎石块度具有较高的经济价值;当损伤度大于 80% 时,岩石形成密集的宏观裂纹,为粉碎状,经济价值较低。损伤度越大,岩石破碎程度越高^[19-20]。因此,可以对 RHT 岩石计算模型中损伤度的变化规律进行分析,进而得出空气间隔位置对岩石破碎程度的影响。利用 Matlab 提取不同损伤度面积,如表 6 所示。

根据表 6 中的数据,计算得到图 9 中不同损伤

表 6 不同损伤度面积提取结果

Tab.6 Area extraction results of different damage

degree factors

| 装药结构 | 损伤度面积 | | | 总计 |
|------|--------|---------|--------|---------|
| | <30% | 30%~80% | >80% | |
| 1# | 75 463 | 71 934 | 20 196 | 167 593 |
| 2# | 71 202 | 77 854 | 18 754 | 167 801 |
| 3# | 67 150 | 81 865 | 18 954 | 167 969 |
| 4# | 67 145 | 81 859 | 18 201 | 167 205 |
| 5# | 71 553 | 77 633 | 18 356 | 167 542 |
| 6# | 74 332 | 74 810 | 18 635 | 167 777 |

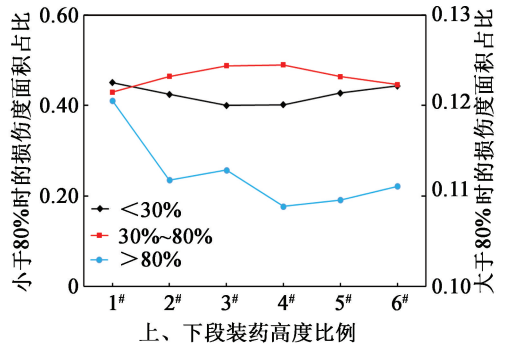


图 9 岩石损伤度变化曲线

Fig. 9 Variation curves of rock damage degree

度对应的面积占比随空气间隔位置的变化。

由图 9 岩石损伤度计算结果可知:中部空气间隔装药时,随着上段装药长度的增加,岩体大于 80% 损伤度的面积占比先减小、后增大、再减小;损伤度小于 30%,对应面积占比先减小、后增大;损伤度在 30%~80% 之间,对应面积占比先增大、后减小,说明不同空气间隔位置能够改变爆破碎石块度的分布规律。当上、下段装药高度比例为 5:5 时,粉料的产生率最低,具有经济价值的碎块占比最高,大块的占比也相对较低。因此,空气柱上、下段装药高度相等时,为最佳空气间隔装药。

通过 6 种不同中部空气位置间隔装药炮孔周围岩体及孔壁受力情况分析,可得出:

1) 中部空气间隔装药时,装药段孔壁上峰值冲

击压力呈现开口向上的抛物线分布特征,装药段孔壁上会在装药段两端出现多个峰值冲击压力。上段孔壁峰值冲击压力先增大、后减小。空气柱段孔壁受到的冲击压力呈现 W 字型增减变化规律。

2) 依据 ANSYS-DYNA 模拟计算结果,综合考虑孔壁冲击压力变化、炮孔周围岩体应力变化规律及损伤度变化规律,上、下段装药长度接近时,碎石块度分布相对均匀。具体空气间隔装药结构对爆破碎石块度的影响规律还需要进行现场爆破实验。

3 现场爆破实验

箬帽山 A 区 120 平台,为 90°垂直爆破平台,主要岩石类型为灰岩,平台高 17 m,炮孔超深 1.5 m,炮孔直径为 210 mm,单次爆破孔数为 20 个,双排炮孔,采用梅花形布孔方式,逐孔起爆。孔间距为 9.5 m,排间距为 4.5 m。现场使用多孔粒状铵油炸药,爆速为 3 200 m/s。现场装药高度为 12 m,空气间隔长度为 1 m,爆破上、下段装药的长度比为 2 : 8、3 : 7、4 : 6、5 : 5、6 : 4 和 7 : 3 共 6 种情况。爆破实验时,平台前无压渣。为避免因单次爆破实验现场地质条件和取样条件不一致造成的实验误差,每组进行 3 次爆破实验,对实验结果取平均值。

进行装药结构爆破实验后,对典型的碎石块度粉笔地点进行拍照。拍照时,为避免因为照片的缩放影响实验分析结果,放置一个固定量程的毫米刻度尺。

利用 WipFrag 软件对炮堆碎石块度进行分析。WipFrag 能够识别照片中碎石的块度,依据照片中钢尺的长度自动计算不同碎石粒径的占比。

依据 WipFrag 分析结果,得出不同装药结构实验中爆破碎石块度的分布,如表 7 所示。

平均粒径为

$$\delta = \sum_{i=1}^n m_i d_i \quad (15)$$

表 7 块度分析

Tab. 7 Block size analysis of rocks

| 装药比 | 平均粒径/ mm | 粒径占比/% | | | | |
|----------------|-------------|--------|-------------|--------------|---------------|---------|
| | | ≤10 mm | >10 ~ 50 mm | >50 ~ 100 mm | >100 ~ 400 mm | >400 mm |
| 1 [#] | 301.02 | 4.96 | 12.22 | 12.22 | 58.94 | 23.88 |
| 2 [#] | 298.41 | 6.60 | 13.70 | 13.70 | 54.78 | 24.92 |
| 3 [#] | 277.79 | 9.58 | 15.24 | 15.24 | 53.48 | 21.71 |
| 4 [#] | 295.80 | 6.43 | 12.84 | 12.84 | 57.09 | 23.64 |
| 5 [#] | 286.54 | 7.68 | 13.52 | 13.52 | 56.66 | 22.14 |
| 6 [#] | 293.05 | 4.95 | 11.88 | 11.88 | 61.75 | 21.42 |

式中: m_i 为不同粒径碎石的质量分数; d_i 为每组粒径的最大值和最小值的平均值。

由表 7 可以得出:当上方装药长度增加时,骨料碎石的平均粒径先减小、后增大;当上、下段装药长度比例为 4 : 6 时,平均粒径最小。

当碎石粒径大于 400 mm 时,定义为大块。将粒径小于 10 mm 的碎石定义为粉料。从表 7 中可以看出:在仅改变装药结构的条件下,爆破抛掷碎石中大块和粉料的占比呈现先减小、后增大的变化规律,碎石块度分布变化规律与数值模拟分析结果基本一致。

炮孔孔壁受到的的冲击压力直接影响着粉料的产生率,冲击波的衰减变化率直接影响着碎石块度的分布变化规律。结合表 7 可知,当空气间隔长度一定时,随着上方装药长度的增加,孔壁收到的冲击压力先减小、后增大。爆破实验受地质条件、现场装药精度和炮孔堵塞效果等因素的影响,最佳装药比例虽与理论分析和数值模拟结果不一致,但变化规律与前文分析结果基本一致。

炮孔周围岩体受到的冲击压力与装药高度成正比变化关系。本次为垂直边坡深孔爆破,在对有一定倾角的边坡进行空气间隔爆破开采时,可以考虑适当增加空气间隔下段装药的长度。

4 结论

综合运用理论分析和数值模拟的研究方法,对孔壁受力和炮孔周围岩体应力分布变化规律进行分析,优化空气间隔装药结构,以达到降低骨料矿山粉料和大块的产生率的目的。

1) 运用 Starfield 迭加法,推导得到中部空气间隔装药下的孔壁初始冲击压力随空气间隔位置的计算表达式及孔壁受到的最大冲击压力变化趋势。

2) 当采用中部空气间隔装药时,炮孔孔壁受到

的冲击压力呈现装药段大、空气段小的下凹型分布特点,且孔壁上出现2个峰值冲击压力,冲击波以8字型向炮孔周围传播。

3)理论分析、数值模拟分析结果和现场碎石块度分布结果表明,在进行空气间隔装药时,上、下段的装药长度接近时,碎石块度分布较为均匀,大块及粉料的产生率相对较低。

参 考 文 献

- [1] 尹岳降,夏文俊,卢文波,等. 灰岩矿爆破开采岩粉成因及其控制研究[J]. 工程爆破, 2021, 27(6): 44-51.
YING Y J, XIA W J, LU W B, et al. Study on genesis and control of rock powder of limestone mine during rock blasting [J]. Engineering Blasting, 2021, 27(6): 44-51.
- [2] 康永全,薛里,孙崔源,等. 间隔不耦合装药结构形式及特点分析[J]. 工程爆破, 2020, 26(5): 62-67.
KANG Y Q, XUE L, SUN C Y, et al. Structural form and characteristic analysis of charge structure with deck decoupling [J]. Engineering Blasting, 2020, 26(5): 62-67.
- [3] 朱红兵,卢文波,吴亮. 空气间隔装药爆破机理研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(5): 986-990.
ZHU H B, LU W B, WU L. Research on mechanism of air-decking technique in bench blasting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(5): 986-990.
- [4] 楼晓明,王振昌,陈必港,等. 空气间隔装药孔壁初始冲击压力分析[J]. 煤炭学报, 2017, 42(11): 2875-2884.
LOU X M, WANG Z C, CHEN B G, et al. Initial shock pressure analysis for hole wall with air-decked charge [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(11): 2875-2884.
- [5] 楼晓明,官旭晖,曾令峰,等. 孔底间隔装药孔壁冲击压力特性[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(6): 065201.
LOU X M, GUAN X H, ZENG L F, et al. Characteristics of the impact pressure of the hole wall by interval charge at the hole bottom [J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(6): 065201.
- [6] 杨国梁,杨仁树,姜琳琳. 轴向间隔装药爆破沿炮孔的压力分布[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(6): 653-657.
YANG G L, YANG R S, JIANG L L. Pressure distribution along borehole with axial air-deck charge blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(6): 653-657.
- [7] 张馨,孙金山,张湘平,等. 钻孔爆破炮孔孔壁压力计算模型[J]. 爆破, 2021, 38(3): 1-5.
ZHANG X, SUN J S, ZHANG X P, et al. Calculation model of blasthole pressure [J]. Blasting, 2021, 38(3): 1-5.
- [8] 叶志伟,陈明,魏东,等. 不耦合装药爆破孔壁压力峰值的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(5): 055201.
YE Z W, CHEN M, WEI D, et al. Experimental study on the peak pressure of borehole wall in decoupling charge blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(5): 055201.
- [9] 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): 064901.
YE Z W, CHEN M, LI T, 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): 064901.
- [10] 谢烽,江雅勤,余德运,等. 钙结砾岩空气间隔装药爆破试验及应用[J]. 爆破, 2020, 37(4): 63-68.
XIE F, JIANG Y Q, YU D Y, et al. Test and application of calcium conglomerate air-decked charge blasting [J]. Blasting, 2020, 37(4): 63-68.
- [11] 刘庆,康强,赵明生. 采石场空气间隔装药数值模拟及应用[J]. 爆破, 2013, 30(3): 65-69.
LIU Q, KANG Q, ZHAO M S. Numerical simulation and application of air deck charging in quarry [J]. Blasting, 2013, 30(3): 65-69.
- [12] 李顺波,李泽华,李宏伟,等. 顶部空气间隔装药对岩石爆破块度影响的试验研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(6): 61-64.
LI S B, LI Z H, LI H W, et al. Experimental study on the influence of top air-deck charge on rock fragmentation in blasting [J]. Explosive Materials, 2020, 49(6): 61-64.
- [13] 张晓平,马建军,刘令. 露天深孔空气间隔装药爆破的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33): 13599-13605.
ZHANG X P, MA J J, LIU L. Numerical simulation of open-air deep-hole air-decking charge blasting [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(33): 13599-13605.
- [14] 张袁娟,赵强,李星. 台阶爆破间隔装药最佳间隔位置确定方法[J]. 煤矿安全, 2016, 47(8): 230-232, 236.
ZHANG Y J, ZHAO Q, LI X. Determination method for optimum spacing position of spaced loading of bench blasting [J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(8): 230-232, 236.

[15] 张迎吉, 周建敏, 徐文文, 等. 不同位置空气间隔装药爆破减振和破碎效果试验[J]. 工程爆破, 2015, 21(1): 15-19.
ZHANG Y J, ZHOU J M, XU W W, et al. Experiment on effect of vibration reduction and rock fragmentation for different positions air-decking charge blasting [J]. Engineering Blasting, 2015, 21(1): 15-19.

[16] 卢文波. 岩石爆破中应力波的传播及其效应研究[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1994.

[17] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
DAI J. Dynamic behaviors and blasting theory of rock [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002.

[18] 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, 20(2): 144-147.
DAI J. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2001, 20(2): 144-147.

[19] 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.
YANG R S, XIAO C L, LING Y L, et al. A fractal study on blasting damage of an eccentric decouple charge structure [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(12): 129-134.

[20] 杨仁树, 许鹏. 爆炸作用下介质损伤破坏的分形研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(12): 3065-3071.
YANG R S, XU P. Fractal study of media damage under blasting loading [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(12): 3065-3071.

版 权 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部