

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2024.07.015

不同耦合介质下岩石损伤特性数值模拟

李昊明^{1,2}, 李祥龙^{2,3}, 王建国^{2,3}, 胡启文^{2,3}, 武永博^{2,3}

- (1. 昆明理工大学 公共安全与应急管理学院, 昆明 650093;
2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;
3. 云南省教育厅爆破新技术工程研究中心, 昆明 650093)

摘要:为探究空气和水不耦合爆破的岩石损伤特性,利用数值模拟分析了五组不耦合系数模型爆破后的岩石损伤演化过程、破裂范围以及孔壁峰值压力,最后开展现场试验验证数值模拟结果。结果表明:随着径向不耦合系数增大,空气不耦合爆破的岩石损伤区域范围衰减更加明显;水不耦合爆破产生的初始冲击波能量更大,传播过程中的能量利用率更高,且由于水介质的几乎不可压缩性,能量能够较平缓而均匀地作用在炮孔壁上;相同不耦合系数条件下,水不耦合爆破后的孔壁峰值压力更大,但水介质能够对孔壁产生较好的保护作用,进行隧道光面爆破试验后效果更好。以上研究可为隧道光面爆破装药结构选择提供一定的参考依据。

关键词:不同耦合介质;不耦合系数;孔壁峰值压力;裂纹扩展;岩石损伤

中图分类号:TD85

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2024)07-0121-09

Numerical Simulation of Rock Damage Characteristics under Different Coupling Media

LI Haoming^{1,2}, LI Xianglong^{2,3}, WANG Jianguo^{2,3}, HU Qiwen^{2,3}, WU Yongbo^{2,3}

- (1. School of Public Safety and Emergency Management, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
3. Advanced Blasting Technology Engineering Research Center of Yunnan Province Education Department, Kunming 650093, China)

Abstract: In order to explore the rock damage characteristics of air and water uncoupled blasting, the rock damage evolution process, fracture range and peak pressure of hole wall after blasting of five groups of uncoupled coefficient models were analyzed by numerical simulation. Finally, field tests were carried out to verify the numerical simulation results. The results show that with the increase of the radial uncoupling coefficient, the attenuation of rock damage area caused by the air uncoupling blasting is more obvious. The initial shock wave energy produced by the water-uncoupled blasting is larger, and the energy utilization rate in the propagation process is higher. Due to the almost incompressibility of the water medium, the energy can act on the hole wall more smoothly and evenly. Under the condition of the same uncoupling coefficient, the peak pressure of the hole wall after water uncoupling blasting is larger, but the water medium can produce better protection effect on the hole wall, and the effect is better after the tunnel smooth blasting test. The above research can provide a certain reference for the selection of tunnel smooth blasting charge structure.

Key words: different coupling media; uncoupling coefficient; peak pressure of hole wall; crack propagation; rock damage

收稿日期:2024-04-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52274083);云南省重大科技专项(202102AG050024)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(52274083); Yunnan Province Major Science and Technology Special Project(202102AG050024)

作者简介:李昊明(1999—),男,硕士研究生,主要从事爆破参数优化和爆炸冲击动力学研究。

通信作者:李祥龙(1981—),男,博士,教授,主要从事爆破理论和爆破安全与技术研究。

引用格式:李昊明,李祥龙,王建国,等.不同耦合介质下岩石损伤特性数值模拟[J].有色金属工程,2024,14(7):121-129.

LI Haoming, LI Xianglong, WANG Jianguo, et al. Numerical Simulation of Rock Damage Characteristics under Different Coupling Media[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(7): 121-129.

光面爆破可以有效控制岩石损伤,形成光滑平整的开挖轮廓面,目前被广泛应用于露天开挖和各类地下工程施工中^[1-2]。影响光面爆破效果最主要的两个因素就是耦合介质以及不耦合系数,研究两者与岩石爆破损伤模式之间的关联性,可以有效优化爆破参数,提高爆破质量。

目前在不耦合系数计算方面的较多,主要从爆破孔壁峰值压力和应力波传播方面展开研究^[3-4],这两方面是分析岩石破坏情况的重要指标,费鸿禄等^[5]较早提出了考虑爆破孔壁压力峰值和炮孔间裂隙发育的不耦合系数计算方法,宗琦等^[6]基于空气不耦合装药结构爆破推导了水不耦合装药结构下的孔壁压力峰值计算方法和应力波衰减规律。由于岩石爆破的应力场变化非常复杂,容易受到岩石种类和炸药性质的影响。理论计算得到的最佳不耦合系数常常不能直接用于现场爆破作业,部分学者开展模型试验和现场试验来进行验证^[7-9],但该方法成本太高,而利用数值模拟就可以有效解决上述问题,能够高效率的进行爆破参数初选。

现有文献对隧道水不耦合爆破破岩机理研究较少,本文以动省隧道为研究背景,利用数值模拟定量研究了空气和水不耦合爆破下岩石损伤演化过程、破裂范围,对比了两种装药结构下的爆破孔壁峰值压力,最后以动省隧道含水区域为实验场地,得出选出适合本项目的最佳不耦合系数。研究结果对隧道含水区域爆破具有重要的指导实践意义。

1 不耦合装药爆破机理分析

1.1 空气不耦合爆破孔壁初始冲击压力

在径向不耦合装药爆破的情况下,爆生气体在炮孔内经历等熵膨胀,此时孔壁上的压力峰值为^[10]:

$$P_r = \frac{\rho_e D^2}{2(\gamma+1)} \left(\frac{1}{K_d} \right)^{2\gamma} \quad (1)$$

式中: ρ_e 表示炸药的密度, kg/m^3 。 D 表示炸药爆炸速度, m/s 。 γ 表示绝热指数,通常取 3。 K_d 表示径向不耦合系数,为炮孔直径和药卷直径的比值。

1.2 水不耦合爆破孔壁初始冲击压力

水不耦合爆破破坏过程主要是冲击波首先在周围岩石上发生侵彻作用,形成裂缝,高速水流和爆轰气体(气泡团破裂后形成的)进入裂缝后起到了“水楔”和“气楔”的作用,在此方向上优先扩展和延伸,实现了对裂缝初始开裂点位置和裂纹扩展方向的

控制。

在爆破过程中产生的冲击波在径向传递时会使水介质受到压缩,在此过程中消耗部分能量导致压力峰值降低,当冲击波传播至孔壁时,其压力峰值为^[11]:

$$P_r = \frac{B}{\bar{R}_0^{\alpha_0}} \quad (2)$$

式中: $\bar{R}_0$ 是常数,与炮孔半径和炸药性质有关。 $\bar{R}_0 = r_b / \sqrt{Q_c}$, r_b 表示炮孔半径, m ; Q_c 表示炸药的 TNT 当量, kg/m 。 α_0 是常数,与应力波衰减速率有关,一般取 0.72。

1.3 不耦合系数研究

若爆炸不对孔壁造成破坏,此时的爆破产生的压力峰值 σ_{rmax} 应当小于岩体抗压强度 σ_{cd} :

$$\sigma_{\text{rmax}} < \sigma_{\text{cd}} \quad (3)$$

相邻炮孔处的应力为^[12]:

$$\sigma = 2b \frac{P_r}{\left(\frac{L}{r_b} \right)^{a_0}} \quad (4)$$

式中: b 是常数,与岩石岩性有关。 $b = v/(1-v)$, v 表示泊松比。 L 表示 1/2 孔间距, m 。

若要形成平整度较高的轮廓面,叠加拉应力 σ 应大于岩体的抗拉强度 σ_{td} , 所以:

$$\sigma > \sigma_{\text{td}} \quad (5)$$

联立式(1)、(3)、(5)可得空气不耦合系数的取值范围:

$$\sqrt[2\gamma]{\frac{\rho_e D^2}{2\sigma_{\text{cd}} \bar{R}_0^{\alpha_0} (\gamma+1)}} < K_d < \sqrt[2\gamma]{\frac{\rho_e D^2}{\sigma_{\text{td}} \left(\frac{L}{r_b} \right)^{a_0} (\gamma+1)}} \quad (6)$$

联立式(2)、(3)、(5)可得水不耦合系数的取值范围:

$$\sqrt[2\gamma]{\frac{B \left(\pi \rho_e \frac{Q_V}{Q_{VT}} \right)^{\frac{a_0}{2}}}{\sigma_{\text{cd}} \bar{R}_0^{\alpha_0}}} < K_d < \sqrt[2\gamma]{\frac{2bB \left(\pi \rho_e \frac{Q_V}{Q_{VT}} \right)^{\frac{a_0}{2}}}{\sigma_{\text{td}} \left(\frac{L}{r_b} \right)^{a_0}}} \quad (7)$$

分析式(6)、(7)可知,在装药条件保持一致的情况下,不耦合系数取值范围与岩石抗压强度 σ_{cd} 、抗拉强度 σ_{td} 皆成反比,说明爆破坚硬致密的高阻抗岩石时需用小不耦合系数。在同种岩石条件下,不耦合系数取值范围与炸药猛度成正比,若要形成平整度高的爆破轮廓面,炸药猛度越高,不耦合系数应越小。

2 数值模拟

2.1 计算模型

现场常用不耦合系数取值范围为 1.50~2.00, 为充分表现出不同耦合系数下的岩石损伤规律^[13-14], 分别取 1.25、1.50、1.75、2.00、2.25 五组不耦合系数。

利用 LS-DYNA 软件来研究空气和水在不同不耦合系数下岩石损伤演化过程以及压力分布特征。数值模型长和宽均设置为 2.5 m, 孔径与现场保持一致, 为 60 mm, 按照不耦合系数 K (1.25、1.50、1.75、2.00、2.25) 分别建五组模型。计算模型如图 1 所示。

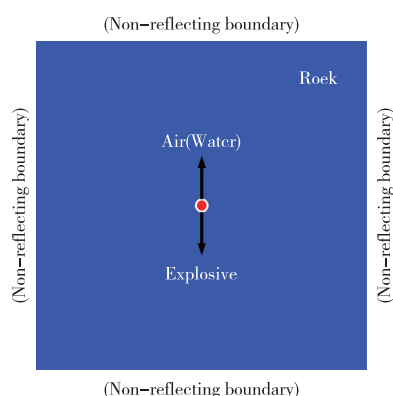


图 1 计算模型示意图

Fig. 1 Calculation model diagram

2.2 计算参数

模型计算采用 ALE 流固耦合算法。为了更好的描述爆破荷载作用下岩石的破裂特征, 选用定义方式为 *MAT_RHT 模型。

研究区域岩石为白云质灰岩, 对其取样后加工成标准圆柱形岩石试件, 试件规格分别为 $\Phi 50 \text{ mm} \times H100 \text{ mm}$, $\Phi 50 \text{ mm} \times H25 \text{ mm}$, 进行单、

三轴压缩试验和巴西劈裂试验后的部分试件破坏后形态如图 2 所示, 岩石的基本物理学参数如表 1 所示。



(a)Single and triaxial compression test specimens



(b)Brazil splitting test specimen

图 2 部分试件破碎后形态

Fig. 2 The shape of some specimens after crushing

使用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型来定义炸药, 采用 JWLV 方程来描述:

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (8)$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 皆是与炸药材料相关的常数。 P 表示爆轰压力, GPa。 V 表示爆炸前后爆轰物变化的体积, m^3 。 E_0 表示单位炸药的初始内能。使用二号岩石乳化炸药进行计算, 具体参数参考表 2^[15]。

表 1 岩石静态力学参数

Table 1 Static mechanical parameters of the rock

Rock samples	Density/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	Compressive strength/MPa	Tensile strength/MPa	Poisson ratio	Angle of internal friction/(°)	Force of cohesion/MPa	Elastic modulus/ GPa
Dolomitic Limestone	2 710	31.16	2.75	0.21	28.16	3.67	11.24

表 2 计算炸药参数

Table 2 Calculate explosive parameters

Density/ ($\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Detonation velocity $D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	E_0/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	V
1 260	3 520	4.192	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	1.0

使用 MAT_NULL 模型来定义空气和水,采用 * EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 方程来描述空气:

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E \quad (9)$$

式中: $C_0 \sim C_6$ 为固定值。 μ 表示材料的可压缩性。 E 表示单位体积的初始内能。

采用 * EOS_GRÜNEISEN 方程来描述水:

$$P = \frac{\rho C^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu - \frac{a}{2} \mu^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)\mu - S_2 \frac{\mu^2}{\mu + 1} - S_3 \frac{\mu^3}{(\mu + 1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + a\mu)E_0 \quad (10)$$

式中: ρ 表示水的密度, kg/m^3 。 C 表示应力波-粒子速度曲线的截距。 γ_0 为常数。 S_1 、 S_2 、 S_3 表示应力波-粒子速度曲线斜率系数。 a 为修正系数。

空气、水相关材料参数见表 3、表 4^[16]。

表 3 空气的材料参数

Table 3 Material parameters of air

Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	V_0	E/Pa
1.26	0	0	0	0	0.4	0.4	0	1.0	0.25

表 4 水的材料参数

Table 4 Material parameters of water

Density/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	C	S_1	S_2	S_3	μ	γ_0	E_0
1 000	1.647	1.92	-0.096	0	8.9E-4	0.35	0.0

2.3 模拟结果

利用后处理软件 LS-Prepost,通过 4 号历史变量可以看出岩石的损伤演化过程。对比右侧损伤值条可判断出岩石的损伤程度,红色表示损伤最大,蓝色表示没有损伤^[17]。

图 3 为不耦合系数 $K=1.25$ 时空气不耦合装药爆破的岩石损伤演化过程。

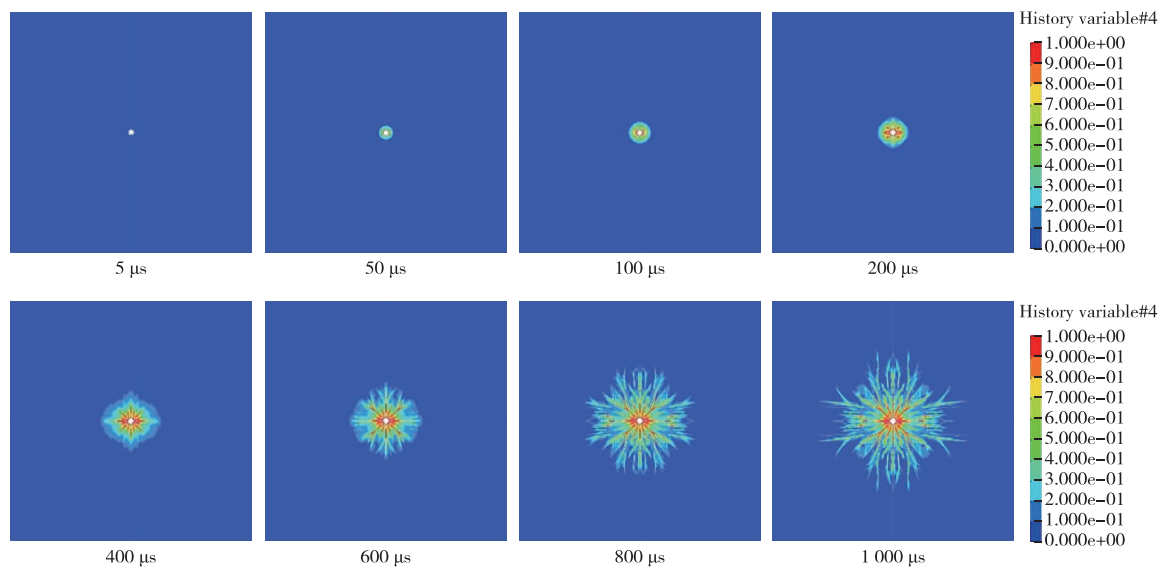


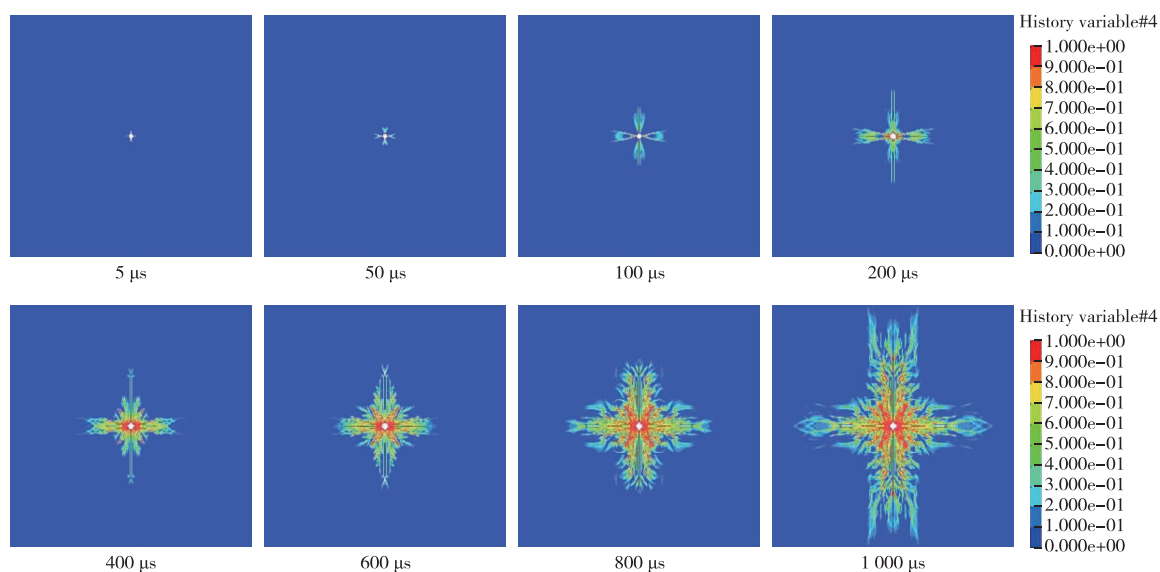
图 3 空气不耦合装药岩石损伤演化 ($K=1.25$)

Fig. 3 Damage evolution of the air-uncoupled charge rock ($K=1.25$)

图 4 分别为不耦合系数 $K=1.25$ 时水不耦合装药爆破的岩石损伤演化过程。

通过图 3、图 4 可清楚地观察爆后岩石损伤扩展情况,RHT 模型爆破后的岩石受到损伤可近似模拟出裂纹扩展情况^[18]。在开始的 $50 \mu\text{s}$ 内,爆炸冲击波呈球形在岩石中传播,岩石中损伤向四周扩展,此时在炮孔壁附近产生爆炸应力峰值远大于岩

石抗压强度,粉碎区产生;随着应力波持续向远离炮孔方向传递,逐渐衰减低至于岩石的动态抗压强度,此时应力波反射形成的拉伸波开始在岩石破坏中占据主导地位,岩石受到拉裂破坏,裂纹开始扩展,岩石损伤范围也随之变大,裂隙区产生;应力波在传播过程中逐渐衰减小于岩石抗拉强度,此时岩石不再受到破坏,损伤范围也保持不变。

图 4 水不耦合装药岩石损伤演化 ($K=1.25$)Fig. 4 Damage evolution of the water-uncoupled charge rock ($K=1.25$)

空气不耦合装药爆破后岩石最终损伤情况如图 5 所示。水不耦合装药爆破后岩石最终损伤情况如图 6 所示。

RHT 模型中的岩石损伤发展过程可近似看作裂纹扩展过程,炸药爆炸后裂纹呈放射状从爆源中心向四周发育,根据岩石损伤值可判断出岩石粉碎区和裂隙区范围^[18]。通过观察图 5 可知,随着不耦

合系数的增加,粉碎区直径分别为炮孔直径的 3.33、2.08、1.67、1.34、1.16 倍,裂隙区直径分别为炮孔直径的 17.50、10.83、9.17、8.33、4.17 倍;由图 6 可以看出,随着不耦合系数的增加,粉碎区直径分别为炮孔直径的 4.66、3.67、2.84、1.67、1.08 倍,裂隙区直径分别为炮孔直径的 20.17、19.34、13.67、12.84、10.34 倍。分析可知空气不耦合装药结构的

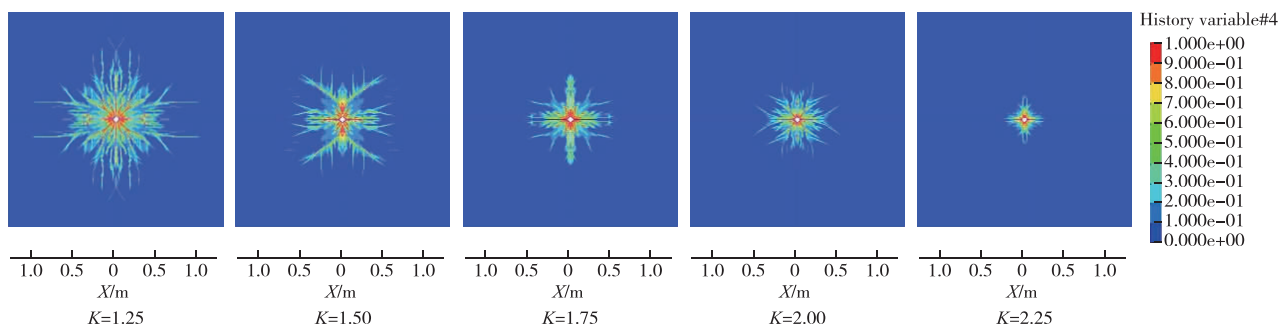


图 5 不同不耦合系数下岩石损伤范围(空气)

Fig. 5 Rock fracture range under different coupling coefficients (air)

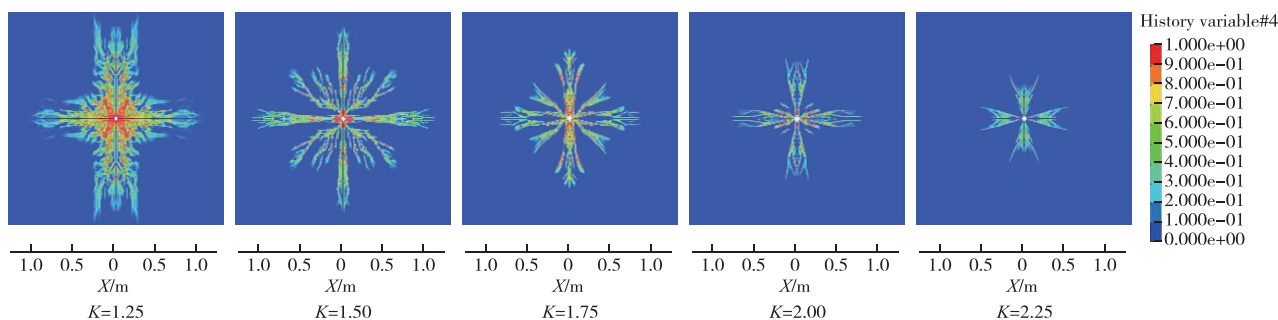


图 6 不同不耦合系数下岩石损伤范围(水)

Fig. 6 Rock fracture range under different coupling coefficients (water)

岩石损伤区域衰减更加明显,因此可知耦合介质的可压缩性越小,岩石损伤区域范围衰减速率越小。

根据上述模拟结果并结合现场实际爆破作业可知,尽管增大不耦合系数可以对炮孔壁起到保护作用,但不耦合系数过大会造成爆破不充分,效果达不到预期,观察岩石损伤的最终形态可以发现,当 $K=2.25$ 时,炸药能量几乎没有作用于炮孔周围岩石上,压碎区和裂隙区范围过小,在实际爆破中造成岩石大块率高,不利于出渣;不耦合系数也不能过小,当 $K=1.25$ 时,耦合介质基本没有对应力波产生衰减作用,导致孔壁附近岩体过度粉碎,对保留岩体造成极大的破坏和损伤。因此,选取合适的爆破参数在实际工程爆破中是极为重要的。

在不同耦合介质(空气、水)5 种不耦合系数(1.25、1.50、1.75、2.00、2.25)模型中布置 A、B 两个测点,A 点位于药卷中心,B 点位于炮孔壁。由于上述 5 种不耦合系数的应力时程曲线变化趋势极为相似,因此只展示 $K=1.25$ 时的应力变化图。

图 7 为空气不耦合装药爆破时 A、B 两点的压力时程曲线。

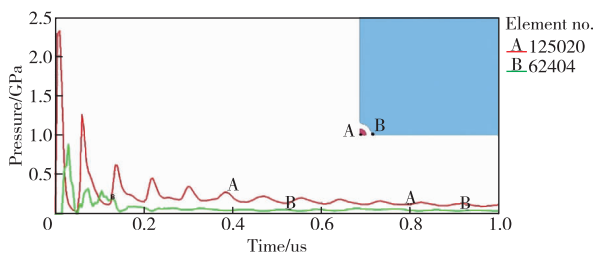


图 7 空气不耦合装药爆破压力时程曲线图($K=1.25$)

Fig. 7 Time-history curve of blasting pressure of the air-uncoupled charge($K=1.25$)

图 8 为水不耦合装药爆破时 A、B 两点的压力时程曲线。

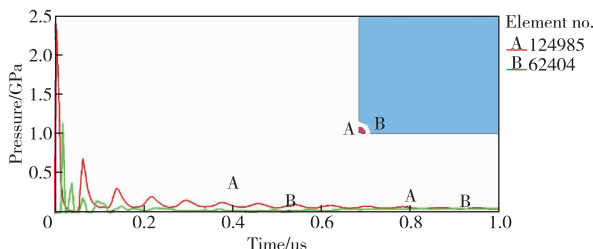


图 8 水不耦合装药爆破压力时程曲线图($K=1.25$)

Fig. 8 Time-history curve of blasting pressure of the water-uncoupled charge($K=1.25$)

由图 7 和图 8 可以看出,空气和水不耦合装药爆破时药卷中心 A 点处的峰值压力分别为 2.306、2.428 GPa,后者峰值压力提高了 5.1%,这是由于

水与空气相比压缩性很小,对药卷起到一定的约束作用,爆炸产生的冲击波能量更大;空气和水不耦合装药爆破时的孔壁 B 点处峰值压力分别为 0.887、1.135 GPa,后者峰值压力提高了 21.8%,水不耦合装药结构的能量利用率高,其压力时程曲线也更加平稳,说明在水介质的作用下,爆炸所释放的能量能够较平缓而均匀地作用在炮孔壁上,对炮孔壁有一定的保护作用,岩石破碎更加均匀;空气不耦合装药爆破时冲击波由 A 点传递到 B 点时峰值压力下降了 61.5%,水不耦合装药爆破时下降了 53.2%,说明在相同装药结构下,水介质的能量传递效率要高于空气介质,这与水与空气两种介质的物理性质相匹配。

在不同耦合介质(空气、水)5 种不耦合系数(1.25、1.50、1.75、2.00、2.25)模型中,取炮孔壁 B 点的压力曲线峰值如图 9 所示。

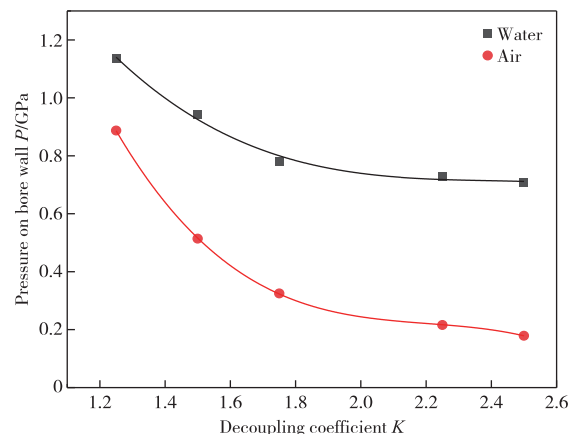


图 9 孔壁压力与不耦合系数的关系

Fig. 9 The relationship between the hole wall pressure and the uncoupling coefficient

在这五种模型中,空气不耦合装药爆破时孔壁 B 点处峰值压力分别为 0.887、0.514、0.325、0.216、0.179 GPa,水不耦合装药爆破时孔壁 B 点处峰值压力分别为 1.135、0.943、0.782、0.727、0.708 GPa。以不耦合系数 $K=1.25$ 时的峰值压力作为对比值,随着不耦合系数的增大,空气不耦合装药爆破时孔壁 B 点的峰值压力分别下降了 42.1%、63.4%、75.6%、79.8%,水不耦合装药爆破时孔壁 B 点的峰值压力分别下降了 16.9%、31.1%、35.9%、37.6%,空气不耦合装药结构的峰值压力衰减速率更加明显。空气不耦合装药爆破时 $K=2.00$ 之前的峰值压力下降幅度较大,之后下降幅度较小且逐渐平缓,最佳不耦合系数取 2.00;同理,水不耦合装药爆破时最佳不耦合系数取 1.75。

由上述模拟以及计算结果可知,空气不耦合爆破时岩石损伤区域范围随不耦合系数增大衰减更明显,其产生的峰值压力衰减的更快;水不耦合装药爆破的能量利用率明显高于空气不耦合装药。因此在实际爆破作业中可以采用水不耦合装药结构,在增大不耦合系数来降低围岩的爆破损伤范围的同时,还能比空气不耦合装药有更高的能量利用率。

3 现场爆破试验验证

勐省隧道位于云南省临沧市沧源县勐省镇,单幅全长 7 183 m,连接金江水泥厂与芒阳村。隧道施工区域围岩以白云质灰岩为主,岩石性质为坚固~中等坚固,普氏等级为Ⅲ~Ⅴ级,比较容易破碎。现场施工时,针对这一地质特点采用非仰拱全断面

开挖。

为验证数值模拟结果是否合理,开展空气不耦合装药爆破与水不耦合装药爆破对比试验。通过上述分析可知,不耦合系数过大(2.25)或过小(1.25)都不利于形成好的爆破效果,因此在不耦合系数 1.50、1.75、2.00 中选取现场试验最佳不耦合系数。由于周边孔和隧道围岩直接接触,起到控制开挖轮廓和围岩损伤的作用,因此试验炮孔皆为周边孔。炮孔直径与数值模型一致,皆为 60 mm,炮孔长度为 3.5 m,孔间距为 800 mm,抵抗线为 960 mm,炮孔堵塞长度为 500 mm,线装药密度为 0.2 kg/m,单孔装药量为 0.6 kg。图 10 为爆后效果图。统计爆破后的半孔率、超欠挖量来分析不同耦合介质对爆破效果的影响,具体试验数据如表 5 所示。



(a) Air-uncoupled charge blasting



(b) Water-uncoupled charge blasting

图 10 不同耦合介质不耦合装药爆破

Fig. 10 Uncoupled charge blasting of different coupling media

表 5 不同耦合介质不耦合装药爆破试验数据

Table 5 Decoupling charge blasting test data for different coupling medium

Charge structure	Group number	Number of holes	Decoupling coefficient	Half hole rate/%	over-under-excavation/cm
Air-decoupling charge structure	1	15	1.50	73.3	18.3
	2	15	1.75	60.0	17.9
	3	15	2.00	66.7	18.2
Water-decoupling charge structure	1	15	1.50	86.6	16.4
	2	15	1.75	93.3	14.6
	3	15	2.00	80.0	15.8

由图 10 可知,水不耦合装药爆破后的的半孔痕更加清晰,壁面更加光滑,可以形成十分明显的爆破轮廓线,爆破效果明显更好。由表 5 分析可知,其他爆破参数都不变的情况下,水不耦合装药爆破半孔率

大大提高,超欠挖明显降低,水不耦合系数为 1.75 时半孔率最高,超欠挖最少。这说明水不耦合装药爆破能量利用率高,能量释放更加平稳,对炮孔壁有更好的保护作用,与前文数值模拟所得规律一致。

4 结论

1) 光面爆破中耦合介质性质和不耦合系数取值直接影响爆破岩石破碎效果。若耦合介质具有较大可压缩性, 爆炸应力波衰减速率以及岩石损伤范围随不耦合系数变化较为明显。

2) 水与空气相比, 可压缩性小, 对药卷起到更好的约束作用, 因此水不耦合装药爆破产生的初始冲击波能量要更大; 炸药在水中爆炸时, 水变形所消耗的能量很少, 能量利用率较高, 爆破时的孔壁峰值压力更大。

3) 由于水的几乎不可压缩性, 爆炸瞬间传递的压力和能量能够较平缓而均匀地作用在炮孔壁上。现场试验验证中, 水不耦合装药爆破半孔率要高于空气不耦合装药, 且壁面更加平整, 超欠挖也得到有效控制。

4) 根据研究可知, 白云质灰岩含水区域的最佳不耦合系数应取 1.75。此时半孔率最高, 为 93.3%, 超欠挖最少, 为 14.6 cm。

参考文献:

- [1] 范勇, 孙金山, 贾永胜, 等. 高地应力硐室光面爆破孔间应力相互作用与成缝机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(6): 1352-1365.
FAN Yong, SUN Jinshan, JIA Yongsheng, et al. Stress interaction and fracture mechanism between smooth blasting holes in high ground stress chamber [J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(6): 1352-1365.
- [2] 付佳佳, 陈必港, 龙涛, 等. “空孔效应”对光面爆破效果的影响分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2017, 69(1): 44-49.
FU Jiajia, GHEN Bigang, LONG Tao, et al. Analysis of the impact of hole effect on smooth blasting effect [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2017, 69(1): 44-49.
- [3] 顾文彬, 王振雄, 陈江海, 等. 装药结构对爆破震动能量传递及爆破效果影响研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 207-211.
GU Wenbin, WANG Zhenxiong, CHEN Jianghai, et al. Study on the influence of charge structure on blasting vibration energy transfer and blasting effect [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 207-211.
- [4] 付玉华, 李夕兵, 董陇军. 损伤条件下深部岩体巷道光面爆破参数研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1420-1426.
FU Yuhua, LI Xibing, DONG Longjun. Study on smooth blasting parameters of deep rock roadway under damage condition [J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1420-1426.
- [5] 费鸿禄, 李守巨, 何庆志. 光面爆破装药不耦合系数的计算[J]. 爆炸与冲击, 1992(3): 270-274.
FEI Honglu, LI Shouju, HE Qingzhi. Calculation of non-coupling coefficient of smooth blasting charge [J]. Explosion and Shock Waves, 1992(3): 270-274.
- [6] 宗琦, 田立, 汪海波. 水介质不耦合装药爆破岩石破坏范围的研究和应用[J]. 爆破, 2012, 29(2): 42-46.
ZONG Qi, TIAN Li, WANG Haibo. Research and application of rock failure range of water medium decoupling charge blasting [J]. Blasting, 2012, 29(2): 42-46.
- [7] 武海军, 杨军, 黄风雷, 等. 不同耦合装药下岩石的应力波传播特性[J]. 矿业研究与开发, 2002, 22(1): 44-46, 49.
WU Haijun, YANG Jun, HUANG Fenglei, et al. Stress wave propagation characteristics of rock under different coupling charges [J]. Mining Research and Development, 2002, 22(1): 44-46, 49.
- [8] 马俊杰, 黄永辉, 张智宇, 等. 某锡矿地下采场爆破参数优化研究[J]. 有色金属工程, 2021, 11(12): 93-99.
MA Junjie, HUANG Yonghui, ZHANG Zhiyu, et al. Optimization of blasting parameters in underground stope of a tin mine [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(12): 93-99.
- [9] 徐颖, 孟益平, 程玉生. 装药不耦合系数对爆破裂纹控制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1843-1847.
XU Ying, MENG Yiping, CHENG Yusheng. Experimental study on blasting crack control by charge decoupling coefficient [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1843-1847.
- [10] 李桐, 陈明, 叶志伟, 等. 不同耦合介质爆破爆炸能量传递效率研究[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(6): 4-14.
LI Tong, CHEN Ming, YE Zhiwei, et al. Study on energy transfer efficiency of blasting explosion in different coupling media [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(6): 4-14.
- [11] 杜俊林, 罗云滚. 水不耦合炮孔装药爆破冲击波的形成和传播[J]. 岩土力学, 2003, 23(增刊 2): 616-618.
DU Junlin, LUO Yungun. Formation and propagation of shock wave in water-uncoupled blasthole charge blasting [J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 23(Suppl. 2): 616-618.
- [12] 杨赛群, 李洪伟, 吴立辉, 等. 影响光面爆破效果和空孔处能量分布的试验研究[J]. 工程爆破, 2022, 28(6): 58-65.

- YANG Saiqun, LI Hongwei, WU Lihui, et al. Experimental study on influence of smooth blasting effect and energy distribution at empty hole [J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(6): 58-65.
- [13] 范勇, 吴凡, 冷振东, 等. 径向不耦合装药爆压消峰作用及其对岩石破裂范围影响[J]. *兵工学报*, 2024, 45(1): 131-143.
- FAN Yong, WU Fan, LENG Zhendong, et al. The effect of radial uncoupled charge on the peak elimination of detonation pressure and its influence on the range of rock fracture[J]. *Journal of Ordnance*, 2024, 45(1): 131-143.
- [14] 陈啸林, 张智宇, 王凯, 等. 深部岩石爆破裂纹扩展与不耦合装药系数的关系[J]. *高压物理学报*, 2023, 37(5): 137-150.
- CHEN Xiaolin, ZHANG Zhiyu, WANG Kai, et al. The relationship between the crack propagation of deep rock blasting and the decoupling charge coefficient[J]. *Acta Physica Sinica*, 2023, 37(5): 137-150.
- [15] YI C, SJÖBERG J, JOHANSSON D. Numerical modelling for blast-induced fragmentation in sublevel caving mines[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2017, 68: 167-173.
- [16] HALLQUIST J. *LS-DYNA keyword user's manual*[M]. California: Livermore Software Technology, 2012: 1204-1218.
- [17] 尹彦波, 周科平, 彭文庆, 等. 露天中深孔小药卷爆破除水研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(9): 2323-2329.
- YIN Yanbo, ZHOU Keping, PENG Wenqing, et al. Study on water removal by blasting of small deep-hole cartridges in open air[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(9): 2323-2329.
- [18] 刘亮, 卢文波, 陈明, 等. 钻爆开挖条件下岩体临界破碎状态的损伤阈值统计研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35(6): 1133-1140.
- LIU Liang, LU Wenbo, CHEN Ming, et al. Statistical study on damage threshold of critical fracture state of rock mass under drilling and blasting excavation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(6): 1133-1140.