

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0381

## 不同耦合介质爆破爆炸能量传递效率研究\*

李桐<sup>1,2</sup>, 陈明<sup>1,2</sup>, 叶志伟<sup>1,2</sup>, 卢文波<sup>1,2</sup>, 魏东<sup>1,2</sup>

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 不耦合装药爆破可有效降低孔壁峰值压力, 改善爆破效果。针对不同耦合介质爆破时爆炸能量的传递问题, 考虑岩体应变率效应, 理论分析了爆炸作用下岩体变形及破坏特征, 得到不同耦合介质爆破时理论爆炸能量的传递效率, 并结合数值模拟研究了岩体性质、炸药类别及不耦合装药系数对不同耦合介质爆破时爆炸能量传递效率差异的影响。研究表明, 爆炸能量传递效率与耦合介质相关, 装药结构相同时, 水耦合爆破比空气耦合爆破爆炸能量传递效率高; 不同耦合介质爆破爆炸能量传递效率的差异受爆破岩体、炸药性质及不耦合装药系数等因素影响; 装药系数相同耦合介质不同的爆破, 岩体强度越高, 不同耦合介质爆炸能量传递效率差别越大; 岩体性质相同时, 不同耦合介质爆破间能量传递效率差异随不耦合装药系数的增大而增大, 对于乳化炸药在粉砂岩中的爆破, 不耦合装药系数由 1.28 增至 3.44 时, 水耦合爆破传递入周围岩体的能量由空气耦合爆破的 1.45 倍增至 6.52 倍。研究结果可对优化爆破设计、改善爆炸能量分布提供参考。

**关键词:** 不耦合装药; 耦合介质; 爆炸能量; 传递效率; 岩体

中图分类号: O389; TD235

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

### Study on the energy transfer efficiency of explosive blasting with different coupling medium

LI Tong<sup>1,2</sup>, CHEN Ming<sup>1,2</sup>, YE Zhiwei<sup>1,2</sup>, LU Wenbo<sup>1,2</sup>, WEI Dong<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,

Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering Ministry of Education,

Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

**Abstract:** Decoupled charge blasting can effectively reduce the peak pressure of hole wall and improve the blasting effect. Aiming at the issues associated with the explosive energy transferred into rock mass with different coupling medium, the deformation and failure characteristics of rock mass under explosion were analyzed theoretically with the consideration of strain rate effect of the rock mass, and the theoretical energy transfer efficiency of blasting with different coupling medium was obtained. Combined with the numerical simulations, the effects of rock mass properties, explosive categories and decoupled charge coefficient on the energy transfer efficiency of blasting with different coupling medium were studied. The results show that the energy transferred into rock mass from explosive of decoupling charge blasting is related to the coupling medium, the energy transfer efficiency of water coupling blasting is higher than that of air coupling blasting for the same charge structure and same blasting medium. When the charge structure and blasting rock mass are the same but the coupling medium is different, the energy transferred into the rock mass from explosive will be different, depending on blasting rock mass, explosive categories and decoupling charge coefficient. When blasting with the same decoupling charge coefficient but

\* 收稿日期: 2020-10-12; 修回日期: 2021-01-06

基金项目: 国家自然科学基金(51979205, 51779193)

第一作者: 李桐(1993—), 男, 博士研究生, [whultong@whu.edu.cn](mailto:whultong@whu.edu.cn)

通信作者: 陈明(1977—), 男, 博士, 教授, 博导, [whuchm@whu.edu.cn](mailto:whuchm@whu.edu.cn)

different coupling medium, the higher the rock mass strength, the greater the difference of energy transfer efficiency between different coupling medium. For blasting with the same rock mass properties and same charge structure, the difference of energy transfer efficiency between air coupling blasting and water coupling blasting increases with the increase of decoupling charge coefficient. For emulsion explosive exploding in siltstone, when the decoupling charge coefficient increases from 1.28 to 3.44, the energy transferred from water coupling blasting to surrounding rock mass increases from 1.45 to 6.52 times of air coupling blasting. The research results are of great reference significance for optimizing blasting design, improving explosion energy distribution and increasing the explosion energy utilization rate.

**Keywords:** decoupled charge; coupling medium; explosion energy; transfer efficiency; rock mass

钻爆法是岩体开挖的主要手段,如何实现爆炸能量的高效利用和爆破危害效应的有效控制是工程爆破技术的研究热点<sup>[1]</sup>。工程实践和研究表明<sup>[2-3]</sup>,径向不耦合装药爆破能有效降低孔壁峰值压力,减少粉碎区范围,改善爆破效果,提高爆炸能量利用率,较耦合装药爆破优势显著。而空气和水是工程爆破中炮孔壁和炸药间常见的两种耦合介质,因其物理性质及动力学特性不同,对爆炸能量传递及爆破效果的改善也存在差异。

目前,爆炸应力波动态作用以及高温高压爆生气体准静态作用联合破岩是岩体爆破破碎主流观点,即爆炸能量分为冲击波能及爆生气体能,炸药能量通过做功传递给岩体,冲击波能主要消耗在粉碎岩体、形成初始裂隙以及诱发岩体振动方面,爆生气体能则耗散于爆腔及初始裂隙的扩张、破碎岩体的抛掷<sup>[4]</sup>等方面。Brinkman<sup>[5]</sup>通过套管试验,观察了模型在爆炸冲击波或爆生气体单独作用下的破坏特征,证实了爆破岩体破裂是由爆破冲击波能和爆生气体能综合作用产生的。Livingston<sup>[6]</sup>通过爆破漏斗试验,总结提出了炸药在岩体中爆破后能量的几种存在形式,主要包括弹性变形能、冲击破裂能、破碎能、抛掷能及空气冲击波能,定性分析了爆炸能量的分布方向。Sanchidrián等<sup>[7]</sup>通过单孔爆破试验计算了岩体内炸药爆破后的能量分布,计算结果表明,地震波能量占炸药总能量的1%~3%,破碎能占炸药总能量的2%~6%,动能占炸药总能量的3%~21%。Hong等<sup>[8]</sup>通过霍普金森压杆试验得出:爆炸产生的冲击波能量撞击炮孔壁后分散为反射能、透射能及岩体破碎能,且岩体破碎能的分配随总入射能的增加近似线性提高。

炸药爆炸传递至岩体中能量的多少与炸药性能、岩体性质和装药结构有关,为提升炸药的能量利用率,学者们对炸药(耦合装药和不耦合装药)与矿岩的匹配进行了广泛的研究,提出了波阻抗匹配<sup>[9]</sup>、全过程匹配<sup>[10]</sup>和能量匹配<sup>[11]</sup>等观点。采用不耦合装药爆破时,耦合介质不同,爆破效果和传至岩体能量的多少也有显著差异。陈世海等<sup>[12]</sup>从理论上对水介质耦合装药爆破与炸药耦合装药的破岩效能进行了讨论,认为水介质耦合装药爆破更能提高炸药的能量利用率;宗琦等<sup>[13]</sup>推导了水介质耦合条件下的孔壁峰值压力和破岩范围,认为炮孔水介质耦合装药比空气介质耦合装药更能提高爆炸能量利用率,增强破岩能力。Jang<sup>[14]</sup>通过数值模拟和现场试验分析了水垫层对岩体爆破的影响,发现爆炸能量与水相互作用在孔底产生了均匀连续的压力转换,使爆块尺寸分布更加均匀,没有巨石产生。顾文彬等<sup>[15]</sup>、Xia等<sup>[16]</sup>分析了装药结构对能量传递的影响,发现爆炸能量的传递受到炸药与岩石的波阻抗、不耦合装药系数及炮孔内耦合介质的压缩程度影响,不同装药结构能量利用存在差别。但是目前的分析多停留在试验及定性分析阶段,缺乏量化指标。

本文将基于波动方程、率相关的岩体破坏分区模型,求解不同耦合介质爆破时爆炸能量的理论传递效率,并通过数值模拟分析耦合介质对爆炸能量传递效率的影响。

## 1 不耦合装药爆破孔壁爆炸荷载峰值计算

不耦合装药爆破时,炸药爆炸产生冲击波,冲击波在传播过程中先后与耦合介质及岩体发生碰撞,并在介质交界面发生透反射。在不同介质的交界面上,界面两侧应存在应力和位移连续,同时任意冲击波均满足质量、动量及能量守恒方程<sup>[17]</sup>:

$$\rho(D-u) = \rho_0(D-u_0) \quad (1)$$

$$p-p_0 = \rho_0(D-u_0)(u-u_0) \quad (2)$$

$$e-e_0 = \frac{(p+p_0)}{2} \left( \frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right) + Q \quad (3)$$

式中: 下标 0 表示波前参数, 其余为波后参数;  $Q$  为介质的比能, 若介质不释放能量, 则  $Q=0$ ;  $p$ 、 $\rho$ 、 $u$ 、 $D$  分别为冲击波的压力、密度、质点速度及传播速度,  $e$  为比内能。

### 1.1 空气耦合爆破

空气耦合爆破时, 炮孔壁入射压力与爆生气体的膨胀过程有关, 当不耦合系数较小时, 爆生气体在炮孔内仅经历等熵膨胀, 此时孔壁入射压力为<sup>[9]</sup>:

$$p_i = \frac{\rho_c D^2}{2(k+1)} \left( \frac{d_c}{d_b} \right)^{2k} \quad (4)$$

当不耦合系数较大时, 爆生气体在炮孔内经历等熵膨胀及绝热膨胀, 此时孔壁入射压力为<sup>[9]</sup>:

$$p_i = \left( \frac{p_w}{p_k} \right)^{\gamma/k} p_k \left( \frac{d_c}{d_b} \right)^{2\gamma} \quad (5)$$

式中:  $p_i$  为炮孔壁入射压力,  $p_w$  为平均爆轰压力,  $p_k$  为临界压力,  $\rho_c$ 、 $D$  分别为炸药密度及爆速,  $d_c$ 、 $d_b$  分别为装药直径及炮孔直径,  $k$ 、 $\gamma$  为绝热指数。

根据爆生气体与岩体交界面上的位移连续, 可得<sup>[3]</sup>:

$$u_t = u_i + u_r \quad (6)$$

式中:  $u_i$  为入射波孔壁质点速度,  $u_i$  和  $u_r$  分别为透射波及反射波孔壁质点速度。

根据波的质量和动量守恒可得任意介质中波的质点速度, 即:

$$u_i = \sqrt{p_i \left( \frac{1}{\rho_{i0}} - \frac{1}{\rho_i} \right)} \quad (7)$$

$$u_r = u_i - \sqrt{(p_r - p_i) \left( \frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_r} \right)} \quad (8)$$

$$u_t = \sqrt{p_t \left( \frac{1}{\rho_{t0}} - \frac{1}{\rho_t} \right)} \quad (9)$$

式中:  $\rho_{i0}$  为入射波波前密度, 即空气初始密度;  $\rho_{t0}$  为透射波波前密度, 即原岩密度。

多方气体的状态方程为<sup>[6]</sup>:

$$e = \frac{p\tau}{\gamma-1} \quad (10)$$

由气体状态方程结合反射波守恒方程可得:

$$\frac{\rho_r}{\rho_i} = \frac{(\gamma+1)p_r + (\gamma-1)p_i}{(\gamma-1)p_r + (\gamma+1)p_i} \quad (11)$$

由交界面上应力连续条件可得:

$$p_t = p_i + p_r \quad (12)$$

取岩石的状态方程为:

$$p_t = A' \left[ \left( \frac{\rho_t}{\rho_{t0}} \right)^k - 1 \right] \quad (13)$$

式中:  $A'$  为常数, 与岩体性质有关;  $k$  为岩石的等熵指数。

联立式(6)~(13)可得空气耦合装药孔壁透射峰值压力。

## 1.2 水耦合爆破

水耦合爆破时,爆生产物首先与水发生碰撞,在水中激起冲击波,在爆生产物与水的交界面上同样满足位移及应力连续条件。由瞬态爆轰的爆轰波波阵面参数基本公式可得<sup>[3]</sup>:

$$u_i = \frac{D}{k+1} \quad (14)$$

根据爆轰产物多方曲线状态方程及反射波动量守恒方程可得:

$$u_r = \frac{2kD}{k^2-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_t}{p_i} \right)^{(k-1)/2k} \right] \quad (15)$$

将式(14)~(15)代入式(6)可得:

$$u_t = \frac{D}{k+1} \left\{ 1 + \frac{2k}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_t}{p_i} \right)^{(k-1)/2k} \right] \right\} \quad (16)$$

水的状态方程可表示为:

$$p_t = A'' \left[ \left( \frac{\rho_t}{\rho_{w0}} \right)^{k''} - 1 \right] \quad (17)$$

式中:  $A''$  为常数,  $k''$  为水的等熵指数,  $\rho_{w0}$  为水密度。

联立式(9)、(16)~(17)可得水耦合爆破水中冲击波初始峰值压力。

冲击波在水中传播伴随着能量耗散及几何衰减,延长药包装药水中超压随相对距离的衰减关系为<sup>[18]</sup>:

$$\Delta p = \begin{cases} \frac{A_1}{\bar{r}^{2.49}} & 1 \leq \bar{r} \leq 2 \\ \frac{A_2}{\bar{r}^{1.45}} & 2 < \bar{r} \leq 5 \\ \frac{A_3}{\bar{r}^{0.63}} & 5 < \bar{r} \leq 240 \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $A_1$  为水中冲击波初始峰值压力,  $\bar{r}$  为相对距离,  $\bar{r} = r/r_c$ , 其中  $r$  为距炮孔中心距离,  $r_c$  为药卷半径。

由式(18)可得水岩界面入射压力,水耦合爆破孔壁透射峰值压力推导过程与空气耦合装药相近,联立式(6)、(12)~(13)、(17)可得水耦合爆破孔壁透射峰值压力。

## 2 基于率相关的岩体爆破破坏范围计算

在爆炸荷载作用下,炮孔周围岩体发生破坏,炮孔近区岩体由近及远分为粉碎区、裂隙区及弹性振动区,但这种岩体破坏分区模型忽略了裂隙区的环向承载力,与实际分布存在较大偏差。冷振东等<sup>[19]</sup>根据现场试验观察提出,在粉碎区及裂隙区间,存在以受压及剪切破坏为主的破碎区,破碎区内冲击波衰减较缓。岩体在爆炸荷载作用下处于强动力响应状态,炮孔近区岩体应变率为:

$$\dot{\epsilon} = u_{r_b} \alpha \left( \frac{r}{r_b} \right)^{-(\alpha+1)} \Big|_{r_b} \quad (19)$$

式中:  $u_{r_b}$  为孔壁峰值质点速度;  $r_b$  为炮孔半径;  $\alpha$  为压力衰减指数,  $\alpha = 2 \pm \mu / (1 - \mu)$ , 在不同破坏区域  $\alpha$  的取值不同。

岩体中任意一点的有效应力为<sup>[20]</sup>:

$$\sigma_i = B p_t \left( \frac{r}{r_b} \right)^{-\alpha} \quad (20)$$

式中:  $B = \frac{1}{\sqrt{2}} [(1 + \lambda)^2 + (1 + \lambda^2) - 2\mu(1 - \mu)(1 - \lambda^2)]^{1/2}$ ,  $\mu$  为岩体泊松比,  $\lambda$  为侧向压力系数。

根据有效应力强度准则,当  $\sigma_i$  满足下式,岩体将会发生破坏:

$$\sigma_i = \begin{cases} \kappa\sigma_{cd}\dot{\varepsilon}^{1/3} & \dot{\varepsilon} \geq \dot{\varepsilon}_{c0} \\ \sigma_{td} \left( 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{t0}} \right)^\gamma \right) & \dot{\varepsilon} \geq \dot{\varepsilon}_{t0} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $\kappa$  为静单轴抗压强度缩小系数,  $\sigma_{cd}$  为岩石静态抗压强度,  $\sigma_{td}$  为静态抗拉强度,  $\dot{\varepsilon}_{c0}$ 、 $\dot{\varepsilon}_{t0}$  分别为抗压强度及抗拉强度临界应变率。

联立式(19)~(21), 可得不同耦合装药爆破岩体破坏范围, 粉碎区范围:

$$r_1 = \left( \frac{\kappa\sigma_{cd}}{B\rho_t} \right)^{\frac{3}{1-2\alpha_1}} \left( \frac{u_{r_b}\alpha_1}{r_b} \right)^{\frac{1}{1-2\alpha_1}} r_b \quad (22)$$

破碎区范围:

$$r_2 = \left( \frac{\kappa\sigma_{cd}}{B\sigma_{r_1}} \right)^{\frac{3}{1-2\alpha_2}} \left( \frac{u_{r_1}\alpha_2}{r_1} \right)^{\frac{1}{1-2\alpha_2}} r_1 \quad (23)$$

裂隙区范围:

$$r_3 = \left( \frac{\sigma_{td}}{B\rho_t(r_1/r_b)^{-\alpha_1}} \left( 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}_\theta}{\dot{\varepsilon}_{t0}} \right)^\gamma \right) \right)^{1/\alpha_3} r_1 \quad (24)$$

式中:  $\sigma_{r_1}$ 、 $u_{r_1}$  为粉碎区边界位置质点应力及振动速度,  $\dot{\varepsilon}_\theta = u_{r_1}\alpha_3(r_3/r_1)^{-(\alpha_3+1)}/r_1$ ;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别为粉碎区、破碎区及裂隙区应力波衰减指数。

### 3 不耦合装药爆破传递入岩体内能量计算

#### 3.1 冲击波能量

##### 3.1.1 冲击波爆腔膨胀

在爆炸冲击荷载作用下, 孔壁岩石将会压缩, 爆腔发生膨胀。爆腔膨胀在岩石压碎过程中持续存在, 在破碎区边缘, 冲击波引起的爆腔膨胀同步结束, 粉碎区及破碎区均消耗了大量冲击波能量。冲击波扩张爆腔的过程中, 扩张范围内岩体质量守恒, 因此有:

$$(r_2^2 - r_b^2)\rho_m = \int_{r_k}^{r_2} 2\rho r dr \quad (25)$$

式中:  $r_k$  为冲击波扩张后爆腔的半径,  $r_2$  为岩体破碎区范围,  $\rho_m$  为原岩密度,  $\rho$  为冲击波波阵面上的岩石瞬态密度。

爆腔扩张过程中, 其波阵面后岩石密度变化很小, 因此冲击波波阵面上岩石瞬态密度  $\rho$  可用压缩后孔壁处岩石密度  $\rho_r$  代替, 根据波阵面上岩石质量守恒以及岩体 Hugoniot 方程可得:

$$\rho_r = \frac{a + bu_{r_b}}{a + (b-1)u_{r_b}} \rho_m \quad (26)$$

式中:  $a$ 、 $b$  为与岩性相关的参数。

联立式(25)~(26)可得, 冲击波爆腔扩张半径为:

$$r_k = \left[ r_2^2 - (r_2^2 - r_b^2)\rho_m/\rho_r \right]^{1/2} \quad (27)$$

由此可得冲击波消耗在岩体爆腔扩张上的能量为:

$$w_1 = \int_{r_b}^{r_k} 2\pi r p_r \bar{r}^{-\alpha} dr \quad (28)$$

##### 3.1.2 冲击波裂隙扩张

冲击波在岩体内逐渐衰减, 在破碎区边缘基本衰减为应力波, 此时径向应力已经小于岩体抗压强度, 但环向应力仍大于岩体抗拉强度, 会引起岩体开裂。岩体中  $r$  处的应力波切向应力为:

$$\sigma_{\theta} = \lambda p_1 \bar{r}^{-\alpha} \quad (29)$$

此时裂隙长度为  $a$ , 若  $\sigma_{\theta} > [\sigma_{td}]$ , 裂隙将进一步扩展, 假定裂隙扩展到  $a + \delta_a$  时, 切向应力衰减到抗拉强度, 裂隙停止扩展; 此时裂隙在切向应力作用下产生了切向位移, 切向力对岩体做功, 在此过程中切向力做功近似为:

$$\delta_w = 2 \int_0^{\delta_a} \frac{1}{2} \sigma_{\theta} u_{\theta} da \quad (30)$$

由断裂力学可得<sup>[21]</sup>:

$$\sigma_{\theta} = \frac{k_2}{\sqrt{2\pi a}} \quad (31)$$

$$u_{\theta} = \frac{k_1}{E_m} \sqrt{\frac{\delta_a - a}{2\pi}} (1 + \mu)(f + 1) \quad (32)$$

式中:  $f = (3 - 4\mu)$ ,  $k_1$ 、 $k_2$  为长度不同的裂隙端部的应力强度因子, 为简化计算可近似认为裂隙扩展过程中强度因子保持不变,  $E_m$  为岩石弹性模量。

联立式(30)~(32)可得裂隙扩展过程中切向应力所做的功为:

$$w_2 = n \int_{r_b}^{r_3} \delta_w dr = \int_{r_b}^{r_3} \frac{nk_2^2}{E_m} (1 - \mu^2) dr \quad (33)$$

式中:  $n$  为径向主裂隙条数, 根据相关试验文献,  $n = 4 \sim 12$ 。

### 3.1.3 应力波引起的弹性变形

随着应力波的进一步衰减, 裂隙区外应力波不再造成岩体破坏, 仅引起弹性振动, 柱状坐标系下单位体积岩体发生弹性变形需要的能量为<sup>[22]</sup>:

$$\Delta E = \frac{1}{2} (\sigma_r \varepsilon_r + \sigma_{\theta} \varepsilon_{\theta}) \quad (34)$$

由变形区  $r \rightarrow \infty$  得到, 应力波引起岩石弹性变形所做的功为:

$$w_3 = \int_{r_3}^{+\infty} 2\pi r \Delta E dr = \frac{\pi(1 + \lambda^2)}{E_m} \frac{p_1^2 r_b^2}{2(\alpha - 1)} \quad (35)$$

## 3.2 准静态爆生气体能量

### 3.2.1 准静态荷载扩腔

在冲击荷载作用之后, 爆生气体膨胀压缩耦合介质, 以准静态荷载的形式作用在孔壁上, 爆腔进一步扩大, 当爆腔内准静态压力  $p$  等于围岩压力  $p_s$  时, 准静态爆腔扩张结束。不考虑大气压力及围岩自重影响, 岩体中围岩压力近似为三轴应力状态下岩石的屈服强度  $\sigma_s$ , 其中  $\sigma_s = (\rho_m c_p^2 / \sigma_{cd})^{1/4} \sigma_{cd}$ , 其中  $c_p$  为岩体纵波波速。

考虑到爆生气体在空气与水中的膨胀差异, 分别对空气耦合及水耦合爆破准静态扩腔过程进行分析。

#### (1) 空气耦合装药

空气耦合爆破时, 爆生气体的膨胀过程与距起爆中心的距离有关, 根据式(4)~(5)可得炮孔内任一点爆生气体的膨胀压力为:

$$p = \begin{cases} \frac{\rho_c D^2}{2(k+1)} \left(\frac{r}{r_b}\right)^{2k} & p \geq p_k \\ \left(\frac{p_w}{p_k}\right)^{\frac{\gamma}{k}} p_k \left(\frac{r}{r_b}\right)^{2\gamma} & p < p_k \end{cases} \quad (36)$$

根据准静态爆腔扩张条件及炮孔内爆生气体膨胀压力(式(36))可得准静态荷载爆腔扩张半径  $r_k'$ , 进而可得爆生气体膨胀准静态做功为:

$$w_4 = \int_{r_2}^{r'_k} 2\pi r p dr \quad (37)$$

### (2) 水耦合装药

冲击波扩腔结束后,爆生气体膨胀压缩水至充满爆腔,设此时膨胀压缩过程结束后水的径向压缩量为 $\delta$ ,由水的质量守恒可得压缩后水的密度为:

$$\rho'_w = \frac{(r_b^2 - r_c^2)\rho_w}{r_b^2 - (r_c + \delta)^2} \quad (38)$$

根据流体力学理论,水在压缩过程中满足:

$$dp = -\frac{2k_w r}{r_b^2 - r^2} dr \quad (39)$$

联立式(36)、(38)~(39)可得冲击波扩腔结束后爆生气体半径 $r'_2$ 。

准静态爆生气体扩腔完成后,由准静态爆腔扩张条件可得炮孔内压力平衡方程:

$$p = \sigma_s = p_h \quad (40)$$

式中: $p_h$ 为不耦合介质水中压力。

联立式(36)~(40)可得准静态爆腔扩张结束后爆生气体半径 $r'_k$ ,此过程爆生气体膨胀准静态做功为:

$$w_4 = \int_{r'_2}^{r'_k} 2\pi r p dr \quad (41)$$

### 3.2.2 准静态荷载作用下裂纹扩展

研究表明<sup>[23]</sup>,岩体在应力波作用下产生初始裂隙,随后裂隙在爆生气体准静态荷载作用下进一步扩展。考虑到裂隙长度通常远大于炮孔尺寸,因此可将炮孔尺寸近似为裂隙长度的一部分,此时裂纹尖端的应力强度因子为<sup>[24]</sup>:

$$K_1 = \frac{2}{1-N} \left[ \frac{L(t) + r_b}{\pi} \right]^{1/2} \int_0^{L(t)+r_b} \frac{p(x,t) - \sigma}{\{[L(t) + r_b]^2 - x^2\}^{1/2}} dx \quad (42)$$

式中: $L(t)$ 为准静态扩展裂纹长度, $N$ 为裂纹尖端初始损伤, $p(x,t)$ 为裂隙内准静态荷载分布, $\sigma$ 为远场应力。

当满足下式时裂纹扩展终止:

$$K_1 = K_a \quad (43)$$

假定最终裂纹长度为 $L$ ,对应炮孔内压力为 $p$ ,联立式(36)、(42)~(43)可求得考虑初始损伤情况下最终裂纹长度 $L$ ,进而求得爆生气体准静态作用裂纹扩展做功为:

$$w_5 = n \int_{r_3}^L \frac{(1-\mu^2)}{E} K_1^2 dr \quad (44)$$

### 3.3 爆炸传递入岩体总能量

炸药爆炸传递入岩体内的能量最终消耗于粉碎区、破碎区、裂隙区及弹性振动区,因此各部分能量总和即为爆炸传递入岩体内能量,它们与炸药能量的比值即为不耦合装药爆破爆炸能量传递效率,即:

$$\eta = \frac{w_1 + w_2 + w_3 + w_4 + w_5}{E} \quad (45)$$

式中: $E$ 为单位长度炸药的总能量。

以乳化炸药、花岗岩为例,计算典型装药结构的不同耦合介质爆破时爆炸能量传递的效率。乳化炸药( $\rho_e=1\ 300\ \text{kg/m}^3$ , $D=4\ 000\ \text{m/s}$ )的体积爆热为 $4.192\ \text{GJ/m}^3$ ,花岗岩力学参数如表1所示<sup>[25]</sup>。

不同耦合介质爆炸能量传递效率计算结果如表2所示。根据计算结果可知,水介质相较于空气介

质具有更好的能量传递效果。同时,相较于空气,水的流动黏度大、压缩性低、冲击波衰减缓慢,造成的粉碎区范围大于空气耦合,耗散于粉碎区的能量更多,计算结果与相关试验结论接近。

表 1 花岗岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of granite

岩石类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	纵波波速/(m·s <sup>-1</sup> )	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比
花岗岩	2700	5500	150	15	68	0.24

表 2 不同耦合介质爆炸能量传递效率

Table 2 Energy transfer efficiency of blasting explosion with different coupling medium

K	耦合介质	w <sub>1</sub> /E <sub>0</sub>	w <sub>2</sub> /E <sub>0</sub>	w <sub>3</sub> /E <sub>0</sub>	w <sub>4</sub> /E <sub>0</sub>	w <sub>5</sub> /E <sub>0</sub>	η
1.28	空气	0.123	0.036	0.041	0.004	0.077	0.281
	水	0.249	0.083	0.075	0.079	0.145	0.631

上述研究建立在爆炸荷载垂直作用孔壁的假定基础上,未能完全真实考虑爆炸荷载斜入射以及反射带来的影响,同时爆炸荷载在炮孔耦合介质中的衰减也较难得出理论解,需要采用部分经验公式,这些假定及经验公式为理论上定量分析不同耦合介质爆破的具体能量差异带来困难,可能造成分析结果出现一定误差。下面结合高精度数值模拟方法,分析不同耦合介质爆破时爆炸能量传递效率的差异及其影响因素。

### 4 不同耦合介质爆破爆炸能量传递效率数值模拟

#### 4.1 计算模型及参数

为进一步研究不同耦合介质爆破时爆炸能量传递效率的差异以及爆破介质、不耦合系数及炸药种类对能量传递效率差异的影响,基于实际开挖过程中岩体种类的分布、常用爆破参数及工业炸药类型,选择粉砂岩、石灰岩及花岗岩 3 类性质差异明显的岩体,分别代表软、硬及坚硬类岩体介质,同时选用 6 种常用不耦合装药系数,以及乳化炸药和多孔粒状铵油炸药 2 种典型工业炸药开展相关研究。

数值计算采用非线性动力有限元软件 LS-DYNA,计算模型如图 1 所示,为 1/4 炮孔模型,尺寸为 1.5 m×1.5 m×3 m,为确保能较准确地模拟出真实的爆炸效应,将计算模型中炸药和耦合介质单元的网格尺寸控制在 2 mm 左右,邻近岩石单元尺寸也与炸药/耦合介质单元近似相同,模型网格数量约 38 万,不同工况时保证模型尺寸及网格划分基本一致,计算时间步与模型最小网格匹配;模型边界包括无反射边界、对称边界及自由边界;采用流固耦合算法模拟爆炸荷载的冲击作用。

炸药采用 JWL 状态方程进行模拟,其爆炸过程中的压力和内能及相对体积之间的关系为:

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (46)$$

式中:  $p$  为爆轰压力,  $V$  为爆轰产物的相对体积,其余为方程常数。计算炸药相关参数取值见表 3。

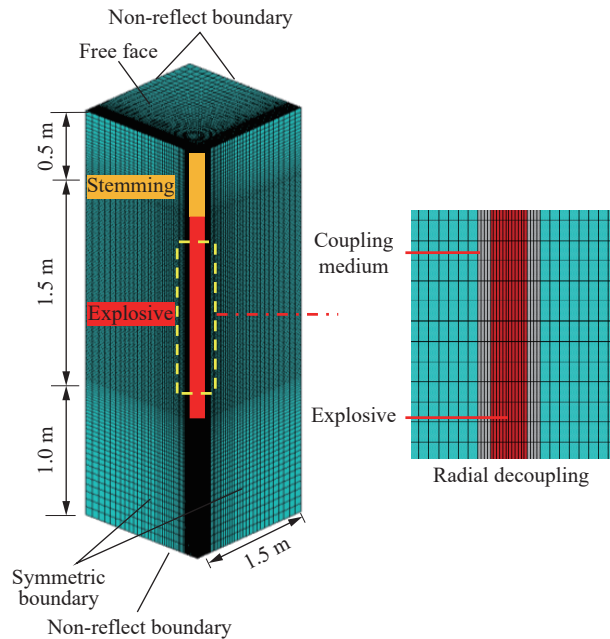


图 1 数值模拟计算模型

Fig. 1 Numerical simulation model



表 3 计算炸药参数

Table 3 Table of charge parameters

炸药类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	爆速/(m·s <sup>-1</sup> )	A/GPa	B/GPa	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	ω	E <sub>0</sub> /GPa
乳化炸药 <sup>[26]</sup>	1300	4000	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.19
铵油炸药 <sup>[27]</sup>	1100	2700	191.2	0.164	4.2	0.9	0.15	2.80

岩体材料采用双线性随动硬化塑性模型, 该模型可以较好地考虑岩体破坏过程中的应变硬化, 应变率敏感性以及毁伤失效等特征, 与理论分析中基于应变率的岩体破坏分区模型相对应, 数值模拟中采用的岩石力学参数如表 4 所示, 与理论计算参数对应, 均取自岩石力学参数手册推荐范围<sup>[25]</sup>。

LS-DYNA 中空气采用 mat\_null 材料模型结合\*EOS\_Linear\_Polynomial 状态方程描述; 水采用 mat\_null 材料模型结合\*EOS\_Grüneisen 状态方程描述, 相关参数取值见文献 [19]。

#### 4.2 计算结果

图 2 中给出了部分典型工况下的爆炸能量时程曲线。由图 2 可知, 相同装药结构下, 相较于空气介质, 水介质具有更好的传能效果, 且爆炸能量增长速率显著快于空气介质, 这与水的压缩性显著低于空气、黏滞度大于空气有关, 与耦合介质的物理性质差异相匹配; 随着时间的推移, 爆炸传至岩体内的能量趋于稳定, 水耦合爆炸能量传递效率显著高于空气耦合装药, 数值模拟结果与前述理论分析结果基本一致。

不同工况下不同耦合介质爆破时爆炸能量传递效率比值如图 3 所示。

表 4 计算岩体力学参数表

Table 4 Table of mechanical parameters of rock mass used in the simulations

岩石类型	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa	切线模量/GPa
粉砂岩	2170	6.7	0.25	39.2	0.6
石灰岩	2600	32.5	0.25	72.9	3.0
花岗岩	2700	68.0	0.24	150.0	7.0

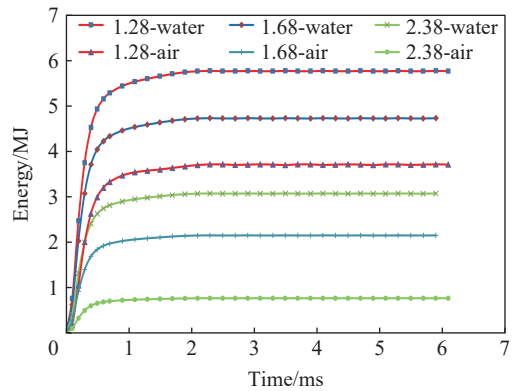


图 2 典型工况下爆炸能量时程曲线

Fig. 2 Time history curve of explosion energy under typical working conditions

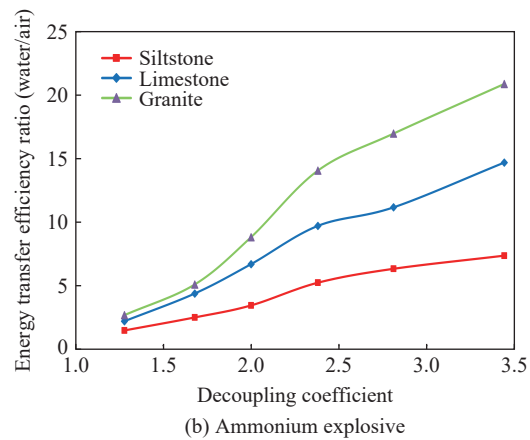
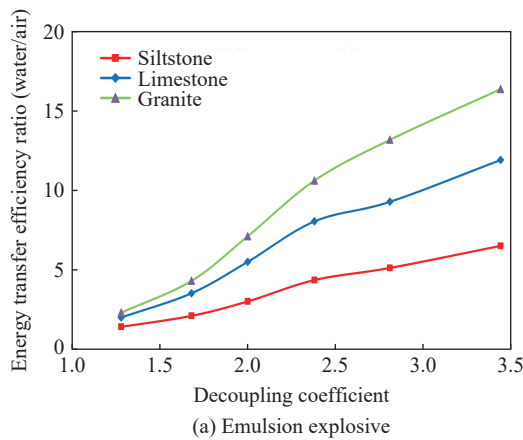


图 3 不同装药结构下不同耦合介质能量传递效率比值

Fig. 3 The ratio of energy transfer efficiency for different coupling medium under different charge structures

由计算结果可知,不同耦合介质间能量传递效率的差值并非定值,受到爆破介质、炸药性质以及不耦合装药系数的影响。在相同装药条件下,花岗岩水耦合爆破比空气耦合爆破时爆炸能量传递效率的提升更加明显,石灰岩、粉砂岩次之,即岩体强度越高能量传递效率差别越大;炸药性质对不同耦合介质爆炸能量传递效率的差值也存在一定的影响,采用乳化炸药爆破时不同耦合介质能量传递效率差异比采用铵油炸药爆破小;当采用同种炸药爆破相同岩体介质时,能量传递效率的差异随不耦合系数的增大逐渐增大,在不耦合系数较小时,不同耦合介质能量传递的效率基本相同,极端情况接近耦合装药情况下,两者能量传递效率基本相当;当不耦合系数较大时,水耦合爆破比空气耦合爆破具有更好的能量传递效果;以乳化炸药在粉砂岩中起爆为例,不耦合系数由1.28增至3.44时,水耦合爆破传递入周围岩体的能量由空气耦合爆破的1.45倍增至6.52倍。

## 5 结 论

通过理论及数值模拟分析,研究了不同耦合介质爆破时爆炸能量传递的效率及其影响因素,得到以下主要结论:

(1)基于波动方程及界面连续条件,求解了不耦合装药爆破孔壁爆炸荷载峰值,进而得到了基于率相关的岩体破坏区范围,并进行了分区能量计算,得到不同耦合介质爆破时爆炸能量的理论传递效率;

(2)装药结构相同时,水耦合爆破比空气耦合爆破减少了爆炸荷载在耦合介质中的衰减,爆炸荷载峰值压力高、作用时间长,提高了爆炸能量传递的效率;

(3)不同耦合介质爆破时爆炸能量传递效率的差值并非定值,受到爆破介质、炸药性质以及不耦合装药系数的影响,相同装药条件下,硬岩(花岗岩、石灰岩)比软岩(粉砂岩)不同耦合介质爆破时能量传递效率的差别更大;

(4)爆破工况相同时,不同耦合介质爆破时爆炸能量传递效率的差异随不耦合系数的增大逐渐增大,以乳化炸药在粉砂岩中起爆为例,不耦合系数由1.28增至3.44时,水耦合爆破传递入周围岩体的能量由空气耦合爆破的1.45倍增至6.52倍。

## 参考文献:

- [1] 中国爆破行业协会. 中国爆破行业中长期科学与技术发展规划(2016~2025年)[M]. 北京:中国爆破行业协会,2015:2-5.
- [2] 王志亮,李永池. 工程爆破中径向水不耦合系数效应数值仿真[J]. *岩土力学*, 2005, 26(12): 1926-1930. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2005.12.012.  
WANG Z L, LI Y C. Numerical simulation on effects of radial water-decoupling coefficient in engineering blast [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(12): 1926-1930. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2005.12.012.
- [3] 王伟,李小春. 不耦合装药下爆炸应力波传播规律的试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(6): 1723-1728. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2010.06.008.  
WANG W, LI X C. Experimental study of propagation law of explosive stress wave under condition of decouple charge [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(6): 1723-1728. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2010.06.008.
- [4] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京:煤炭工业出版社,1984:196-209.
- [5] BRINKMANN J R. Separating shock wave and gas expansion breakage mechanisms [C] // Proceedings of the Second International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Keystone, Colorado, International Organising Committee of Rock Fragmentation by Blasting, 1989: 6-15.
- [6] LIVINGSTON C W. Fundamental concepts of rock failure [J]. *Quarterly of the Colorado school of mines*, 1956, 51(3): 1-11.
- [7] SANCHIDRIÁN J A, SEGARRA P, LÓPEZ L M. Energy components in rock blasting [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(1): 130-147. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2006.05.002.
- [8] HONG L, ZHOU Z L, YIN T B, et al. Energy consumption in rock fragmentation at intermediate strain rate [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, 16(4): 677-682. DOI: 10.1007/s11771-009-0112-5.
- [9] 杨善元. 岩石爆破动力学基础[M]. 北京:煤炭工业出版社,1993:143-144.
- [10] 郭子庭,吴从师. 炸药与岩石的全过程匹配[J]. *矿冶工程*, 1993, 13(3): 11-15.

- GUO Z T, WU C S. The explosive-rock matching throughout the blasting process [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 1993, 13(3): 11–15.
- [11] 赖应得. 论炸药和岩石的能量匹配 [J]. *工程爆破*, 1995, 1(2): 22–26.
- LAI Y D. On energy match between explosive and rock [J]. *Engineering Blasting*, 1995, 1(2): 22–26.
- [12] 陈士海, 崔新壮. 水偶合装药与全偶合装药爆破效能讨论 [J]. *爆破*, 1998, 15(2): 10–13.
- CHEN S H, CUI X Z. Study on blasting efficacy of water coupling and explosive coupling charges [J]. *Blasting*, 1998, 15(2): 10–13.
- [13] 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*, 1998, 29(2): 42–46. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2012.02.011.
- ZONG Q, TIAN L, WANG H B. Study and application on rock damage range by blasting with water-decoupled charge [J]. *Blasting*, 1998, 29(2): 42–46. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2012.02.011.
- [14] JANG H, HANDEL D, KO Y, et al. Effects of water deck on rock blasting performance [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112: 77–83. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2018.09.006.
- [15] 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. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.02.035.
- GU W B, WANG Z X, CHEN J H, et al. Influence of charge structure on the energy transfer of blasting vibration and explosive effect [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(2): 207–211. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.02.035.
- [16] XIA W J, LU W B, LI R Z, et al. Effect of water-decked blasting on rock fragmentation energy [J]. *Shock and Vibration*, 2020, 2020: 8194801. DOI: 10.1155/2020/8194801.
- [17] 王礼立. 应力波基础 [M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 25–29.
- [18] 王伟, 李小春, 石露, 等. 深层岩体松动爆破中不耦合装药效应的探讨 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(10): 2837–2842. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.10.009.
- WANG W, LI X C, SHI L, et al. Discussion on decoupled charge loosening blasting in deep rock mass [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(10): 2837–2842. DOI: 10.16285/j.rsm.2008.10.009.
- [19] 冷振东. 岩石爆破中爆炸能量的释放与传输机制 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017: 53–60.
- [20] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0562.2001.02.005.
- 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. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0562.2001.02.005.
- [21] 布洛克. 工程断裂力学基础 [M]. 王克仁, 何明元, 高桦, 译. 北京: 科学出版社, 1980: 6–22.
- [22] 宗琦, 杨吕俊. 岩石中爆炸冲击波能量分布规律初探 [J]. *爆破*, 1999, 16(2): 1–6.
- ZONG Q, YANG L J. Shock energy distribution of column charge in rock [J]. *Blasting*, 1999, 16(2): 1–6.
- [23] 卢文波, 陶振宇. 爆生气体驱动的裂纹扩展速度研究 [J]. *爆炸与冲击*, 1994, 14(3): 264–268.
- LU W B, TAO Z Y. A study of fracture propagation velocity driven by gases of explosion products [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1994, 14(3): 264–268.
- [24] 徐颖, 孟益平, 宗琦, 等. 断层带爆炸裂隙区范围及裂纹扩展长度的研究 [J]. *岩土力学*, 2002, 23(1): 81–84. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2002.01.018.
- XU Y, MENG Y P, ZONG Q, et al. Study on range of cranny and length of fissure expansion in fault zone [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2002, 23(1): 81–84. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2002.01.018.
- [25] 水利水电科学研究院. 岩石力学参数手册 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1991: 429–434.
- [26] 夏祥, 李海波, 李俊如, 等. 岭澳核电站二期工程基岩爆破安全阈值分析 [J]. *岩土力学*, 2008, 29(11): 2945–2951, 2956. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.11.010.
- XIA X, LI H B, LI J R, et al. Research on vibration safety threshold for rock under blasting excavation [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(11): 2945–2951, 2956. DOI: 10.3969/j.issn.1000-7598.2008.11.010.
- [27] 刘军. 岩体在冲击载荷作用下的各向异性损伤模型及其应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(4): 635–640. DOI: 10.3321/j.issn.1000-6915.2004.04.020.
- LIU J. Anisotropic damage model and its application to rock materials under impact load [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(4): 635–640. DOI: 10.3321/j.issn.1000-6915.2004.04.020.

(责任编辑 曾月蓉)