

# 水不耦合装药爆破模型推导及爆破效果分析\*

程俊飞<sup>1</sup>, 张长亮<sup>2</sup>, 罗志光<sup>2</sup>

(1.重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2.广东省公路建设有限公司江罗分公司, 广州 510699)

**摘要:**基于热力学爆轰理论和断裂力学理论, 针对现有隧道爆破施工中水和空气不耦合装药介质优选的难题, 提出固液气三相爆破计算模型。分析了爆轰炮孔内压随时间的变化、围岩应力场随时间和空间的变化情况以及裂纹尖端应力强度因子, 最后又对某工程算例进行了分析。结果表明, 相同装药结构下耦合装药形成的粉碎区半径最大, 水不耦合装药形成的粉碎区半径大于或等于空气不耦合装药形成的粉碎区; 对于不同的轴向不耦合装药系数, 空气和水都存在裂隙区半径均大于耦合装药的情况; 水不耦合装药爆破, 延长了炮孔内压的作用时间; 当轴向不耦合系数在 1.6~3 时, 水介质比空气介质的爆破增效的作用更强。本文所得结论, 对指导优化爆破现场施工具有重要意义。

**关键词:** 热力学爆轰理论; 断裂力学; 不耦合装药; 应力强度因子; 固液气三相

中图分类号: O382

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2017)06-1616-08

## Analysis on Water Decoupling Charge on Blasting Model and Blasting Effect

Cheng Junfei<sup>1</sup>, Zhang Changliang<sup>2</sup>, Luo Zhiguang<sup>2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R. China;

2. Guangdong Province Highway Construction Co., Ltd. Jiang Luo Branch, Guangzhou 510699, P.R. China)

**Abstract:** Aiming at the optimization problem of decoupling charge medium for water and air in the tunnel blasting construction, the blasting calculation model of the solid-liquid-gas three phases, which is based on the thermodynamics detonation theory and the fracture mechanics theory, is proposed. The blast-hole pressure variation with time, the stress field of the surrounding rock variation with time and space as well as the stress intensity factor at the crack tip are analyzed. Results show that the crushing zone radius of coupling charge is bigger than the decoupling charge of water or air when the axial decoupling coefficient is equal. Moreover, the crushing zone radius of the water decoupling charge is greater than that of the air decoupling charge under the same charge structure. For different axial decoupling coefficients, the radius of the fracture zone that contains both water and air is larger than that of the coupling charge condition. In addition, the action time of blast-hole pressure is prolonged during the water decoupling charge process. When the axial decoupling coefficient ranges from 1.6 to 3, the blasting effect of the water decoupling charge is better than that of the air decoupling charge. The conclusions obtained in this paper can be used to guide and optimize the blasting construction on site.

**Keywords:** thermodynamics detonation theory; fracture mechanics; decoupling charge; stress intensity factor; solid-liquid-gas three phases

\* 收稿日期: 2017-06-07(修改稿)

作者简介: 程俊飞(1988-), 男, 河南安阳人, 硕士, 主要从事岩土工程、地下工程等领域的科研工作。

E-mail: 1253012199@qq.com

基金项目: 广东省交通运输厅科技项目(科技-2015-02-037)

0 引言

近年来对工程爆破的研究,可以概括为以下3个方面。

(1)理论方面:宗琦<sup>[1]</sup>、钟明寿等<sup>[2]</sup>从理论方面研究了耦合装药、水介质不耦合装药和空气介质不耦合装药等几种不同炮孔装药形式,最后得到:在同等装药条件下,孔壁透射压力大小为耦合装药最大,水介质不耦合装药仅次,空气不耦合介质最小。管少华等<sup>[3]</sup>分析了偏心不耦合装药情况下炮孔爆轰内压力值的计算公式。顾文彬等<sup>[4]</sup>从阻抗匹配角度理论出发,研究了耦合装药、空气不耦合装药和水不耦合装药3种结构的爆破能量传递关系。

(2)室内实验与现场实验:管少华等<sup>[3]</sup>、Rommanith 等<sup>[5]</sup>运用有机玻璃实验得到:偏心不耦合装药情况下炮孔周围的裂纹开展情况是不同的,耦合侧大于不耦合侧;最优不耦合系数1.71。孙磊等<sup>[6]</sup>现场实验得到环向和轴向不耦合方法可以有效改善井巷周边的光爆效果和降低爆破耗材。明峰等<sup>[7]</sup>运用室内数值模拟的参数进行了现场爆破试验,得到:水耦合装药有利于炮孔底部围岩的破碎。杨仁树等<sup>[8]</sup>运用爆炸加载数字激光动态焦散线试验系统,对不同装药结构的爆生断裂裂纹的扩展过程进行分析研究。高保彬等<sup>[9]</sup>以华泰煤矿为背景,研究了装药结构和装药介质对工程爆破效果的影响,最终得到水耦合介质装药为较理想结构。曾晶等<sup>[10]</sup>通过对比空气和水不耦合装药技术特点,最终得到:水不耦合装药更加适合石油勘探中应用。曾彬伟等<sup>[11]</sup>以西南地区薄煤层为工程背景,通过现场试验对比分析耦合装药、缝槽空气不耦合装药和缝槽水压不耦合装药的爆破效果。

(3)数值模拟:文献[7,12-14]利用LS-DYNA动力有限元软件,建立了空气和水耦合介质爆破数值模拟模型。结果表明:水耦合介质装药情况下的炮孔壁初始压力明显大于空气耦合介质装药的情况。

综上所述可知:现有理论对水和空气不耦合介质装药的研究主要是室内实验、现场实验和数值模拟,理论方面主要是针对水和空气不耦合介质单独装药情况研究,且只是定性指出水不耦合介质装药

较空气不耦合介质装药更优。本文就此问题展开研究,基于热力学爆轰原理和断裂力学理论,提出了固液气三相模型。并对该模型进行了推导,以某人工钻孔隧道为背景,计算了水和空气不耦合介质分别装药情况下,围岩的应力场随时间和空间的分布情况以及裂纹尖端应力强度因子。比较耦合、水不耦合和空气不耦合装药的粉碎区半径和裂隙区半径,得到水和空气不耦合介质对爆破功效的影响。

1 固液气三相爆炸计算模型

图1(a)为现场实际装药示意图,考虑到炮孔内部炸药、空气和水间断分布情况,故本文只选取模型段推导计算,如图(b)所示。

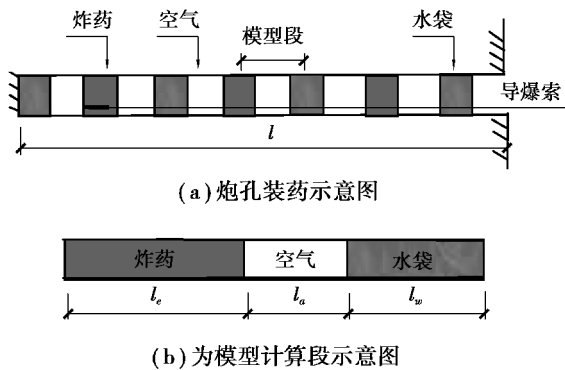


图1 固液气三相爆炸计算模型

Fig.1 Blasting calculation model of the solid-liquid-gas three phases

1.1 爆炸后炮孔内压力计算模型

炸药爆炸之后瞬时形成爆轰内压,较常用初始炮孔平均爆轰压力的计算公式为<sup>[1]</sup>:

$$p_0 = \frac{\rho_e D^2}{2(\kappa + 1)} \tag{1}$$

式中: $\rho_e$ 为炸药密度; $D$ 为炸药爆速; $\kappa$ 为等熵指数,通常取3; $p_0$ 为爆轰初始炮孔平均压力。

在爆轰气体迅速膨胀充满炮孔内空气段的过程中,该过程由于时间非常短暂可以看成等熵绝热过程,故可按热力学爆轰理论进行计算。爆轰理论表明,爆轰气体膨胀过程可分为两个阶段进行:

$$\begin{aligned} pV^\kappa &= p_0 V_0^\kappa (p \geq p_k) \\ pV^\gamma &= p_k V_k^\gamma (p < p_k) \end{aligned} \tag{2}$$

式中: $p$ 为瞬时压力; $V_0$ 为炸药初始体积; $V$ 为气

体瞬时单位质量气体体积; $\gamma$ 为绝热指数,取1.4; $p_k$ 为气体临界压力,取0.2 GPa; $V_k$ 为临界体积。

联立式(1)和式(2)可计算得到临界体积 $V_k$ :

$$V_k = V_0 \frac{\kappa}{\gamma} \cdot \left( \frac{p_0}{p_k} \right) \frac{1}{\gamma} \quad (3)$$

可以计算出当爆轰气体膨胀至临界体积 $V_k$ 时,此时:

$$\frac{V_0}{V_k} = \frac{l_e}{l_e + l_x} = \frac{V_0}{V_0 \frac{\kappa}{\gamma} \cdot \left( \frac{p_0}{p_k} \right) \frac{1}{\gamma}} \quad (4)$$

式中: $l_x$ 为当爆轰气体膨胀至临界体积 $V_k$ 时,空气柱的临界长度。

解得上式:

$$\frac{l_x}{l_e} = V_0^{\frac{\kappa}{\gamma}-1} \cdot \left( \frac{p_0}{p_k} \right) \frac{1}{\gamma} - 1 \quad (5)$$

当 $p \geq p_k$ ,这时 $l_x/l_e \geq l_a/l_e$ 。

$$p_1 = p_0 \left( \frac{V_0}{V_1} \right)^{\kappa} = p_0 \left( \frac{l_e}{l_e + l_a} \right)^{\kappa} \quad (6)$$

当 $p < p_k$ ,这时 $l_x/l_e < l_a/l_e$ 。

$$p_1 = p_k \left( \frac{V_0}{V_1} \right)^{\gamma} = p_k \left( \frac{l_e}{l_e + l_a} \right)^{\gamma} \quad (7)$$

式中: $p_1$ 为爆轰气体膨胀到水界面处时的炮孔压力值; $V_0$ 为爆轰气体体积, $V_0 = \pi r_{02} l_e$ ;  $V_1$ 为炮孔炸药和空气体积, $V_b = \pi r_{02} (l_e + l_a)$ ;  $r_0$ 为炮孔半径; $K_1$ 为轴向不耦合系数, $K_1 = (l_e + l_a)/l_e$ ;  $l_e$ 为装药长度; $l_a$ 为空气柱长度。

水袋被压缩过程也是水袋储存能量的过程,该过程将为下一阶段水袋爆裂、形成新的炮孔水汽内压奠定基础。在此过程中,水不耦合介质在常压看成是不可压缩介质,但是在爆炸高压下,水是可压缩的。水袋压缩过程中,爆轰气体压力下降,而水袋在爆炸压力下体积减小,压力增大,伴随产生对炮孔侧壁的压力。当爆轰气体压力等于水袋内部压力时,炮孔内压达到初次稳定状态,水袋压缩停止。

假定爆轰气体在压缩水袋过程中属于等熵绝热膨胀,由热力学方程可以得到此时炮孔平衡压力为:

$$p_2 = p_1 \left( \frac{V_1}{V} \right)^{\eta} \quad (8)$$

式中: $p_2$ 为压缩水袋压缩稳定时炮孔压力值; $V$ 为水袋压缩稳定时,爆轰气体瞬时体积, $V = \pi r_{02} (l_e + l_a + h)$ ;  $h$ 为水袋压缩长度;参数 $\eta$ 的确定根据空气内压 $p_1$ 与临界压力 $p_k$ 的值来判定,当 $p_1 \geq p_k$ 时, $\eta = \kappa$ ,当 $p_1 < p_k$ 时, $\eta = \gamma$ 。

$$p_2 = p_1 \cdot \left( \frac{l_e + l_a}{l_e + l_a + h} \right)^{\eta} \quad (9)$$

达到平衡状态时,上式化为:

$$p_2 = p_1 \cdot \left( \frac{l_e + l_a}{l_e + l_a + h_0} \right)^{\eta} \quad (10)$$

由于这里 $h_0$ 为未知数,还需要依据流体力学原理和平衡方程引入另一辅助方程<sup>[15]</sup>,整理得到:

$$p_w = E_w \ln \left( \frac{l_w}{l_w - h_0} \right) \quad (11)$$

式中: $p_w$ 为水袋被压缩后的水压值; $E_w$ 为水的体积压缩模量,这里取2.1 GPa; $l_w$ 为水袋长度。

$$p_2 = p_w \quad (12)$$

联立式(10)、式(11)和式(12)可以计算得到达到平衡时的孔壁压力和水袋压缩的长度。

这里假设冲击波撞击炮孔为完全弹性,且是正入射形式,计算得到爆炸应力波入射到围岩孔壁上的初始应力值为:

$$p_{m1} = \frac{2\rho_c C_p}{\rho_c C_p + \rho_0 v_1} \cdot p_2 \quad (13)$$

式中: $p_m$ 为围岩初始入射应力值; $\rho_c C_p$ 为岩石的波阻抗; $\rho_0 v_1$ 为爆轰产物速度为 $v_1$ 时的波阻抗。

伴随爆轰产物作用围岩时,水袋也将释放由前面压缩积蓄的能量。为了计算方便,忽略水袋破裂充满炮孔的时间过程,仅考虑水袋爆裂初始状态体积 $V'_1 = \pi r_{02} (l_w - h_0)$ 和水袋爆裂最终状态体积 $V' = \pi r_{02} (l_e + l_a + h_0)$ ,并假设水袋破裂充满炮孔到平衡的过程为等熵过程。将 $V'_1$ 和 $V'$ 代入式(8)可以得到:

当 $p_2 \geq p_k$ 时,

$$p_k = p_2 \left( \frac{l_w - h_0}{l_k} \right)^{\kappa} \quad (14)$$

$$p_3 = p_k \left( \frac{l_k}{l_e + l_a + l_w} \right)^{\gamma} \quad (15)$$

当 $p_2 < p_k$ 时,

$$p_3 = p_2 \left( \frac{l_w - h_0}{l_e + l_a + l_w} \right)^\gamma \tag{16}$$

式中: $l_k$ 为当压力为 $p_k$ 时,炮孔临界长度。

水袋释放爆炸能量形成爆生水汽炮孔内压在滞后,为了计算这一滞后时间,这里借助伯努利流体方程得到爆生水汽流的速度 $v_w$ :

$$p_2 = p_3 + \frac{1}{2} \rho_w v_w^2 \tag{17}$$

联立式(14)~(17)可计算出 $v_w$ 。水袋放能的滞后时间为:

$$\Delta t = (l_e + l_a)/v_w \tag{18}$$

将式(15)或式(16)代入式(13)可以得到水袋爆破放能入射围岩的压力值:

$$p_{m2} = \frac{2\rho_c C_p}{\rho_c C_p + \rho_w v_w} \cdot p_3 \tag{19}$$

整理可以得到炮孔壁作用围岩入射压力值变化关系,如图2所示。图2中,折线OEF为耦合装药情况下炮孔内压变化情况示意图;折线OAB为固液气三相不耦合装药情况下,爆轰气体的炮孔内压变化情况;折线DBC为水袋破碎形成新的炮孔内压的作用过程。

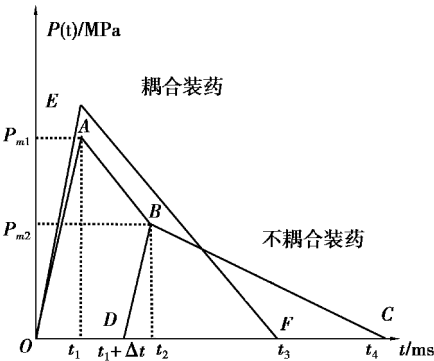


图2 炮孔内压作用过程示意图

Fig.2 Sketch of blast-hole pressure process

1.2 围岩应力场计算

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} &= \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial u}{\partial t^2} \\ \sigma_r(r,t) &= (\lambda + 2G) \frac{\partial u}{\partial r} + \lambda \frac{u}{r} \\ \sigma_\theta(r,t) &= \lambda \frac{\partial u}{\partial r} + (\lambda + 2G) \frac{u}{r} \end{aligned} \right\} \tag{20}$$

$$u(r,t) = \frac{\partial u(r,t)}{\partial t} = 0 (r \geq r_0, t < 0) \tag{21}$$

$$[\sigma_{r1}(r,t)]_{r=r_0} = \begin{cases} 0 (t \leq 0, t > t_4) \\ \frac{P_{m1}}{t_1} t (0 \leq t \leq t_1) \\ \frac{P_{m1} - P_{m2}}{t_1 - t_2} (t - t_2) + P_{m2} (t_1 \leq t \leq t_2) \\ \frac{P_{m2}}{t_2 - t_4} (t - t_4) (t_2 \leq t \leq t_4) \end{cases} \tag{22}$$

$$[\sigma_{r2}(r,t)]_{r=r_0} = \begin{cases} 0 (t \leq \Delta t, t > t_4) \\ \frac{P_{m1}}{t_1} (t - t_1 - \Delta t) (t_1 + \Delta t \leq t \leq t_2) \\ \frac{P_{m2}}{t_2 - t_4} (t - t_4) (t_2 \leq t \leq t_4) \end{cases} \tag{23}$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} [u(r,t)] = 0 (t > 0) \tag{24}$$

式中: $u(r,t)$ 为介质质点径向位移; $\sigma_r, \sigma_\theta$ 为爆轰波引起的径向应力和切向应力; $\lambda, G$ 为拉梅常数, $\lambda = 2uG/(1-2u)$ ;  $u$ 为岩石泊松比; $C_p$ 为介质弹性波纵波波速,且 $C_p = \sqrt{(\lambda + 2G)/\rho}$ ;  $\rho$ 为介质密度。

为计算方便这里简化围岩为轴对称、线弹性的计算模型。炮孔内压将在围岩介质中激发起弹性应力波,控制方程和应力边界条件<sup>[16]</sup>为式(20)~(24)。

为了计算方便,这里作出简化,图2中 $AO \parallel BD$ ,将式(13)和式(19)代入可以得到:

$$t_2 = \Delta t + t_1 + \frac{P_{m2}}{P_{m1}} \cdot t_1 = \frac{l_e + l_a}{\sqrt{\frac{2p_2}{\rho_w} \left[ 1 - \left( \frac{l_w - h_0}{l_e + l_a + l_w} \right)^\kappa \right]}} + \left( 1 + \frac{P_{m2}}{P_{m1}} \right) \cdot t_1 \tag{25}$$

式中: $P_b$ 为耦合装药时围岩的入射压力峰值。  
无法直接计算出式(20)~(24)的解析解,需要运用数值方法进行求解;运用拉普拉斯变化和Stehfest数值反演<sup>[17-18]</sup>,可以计算出围岩中任意位置、任意时间的应力状态 $\sigma_r$ 和 $\sigma_\theta$ 。  
同时,需要考虑爆生水汽形成的围岩应力场,我们这里近似取爆生水汽沿裂缝的传播规律遵循如下形式:



$$p_w(r) = p_3 \cdot \left(\frac{r_0}{r}\right)^2 \tag{26}$$

1.3 粉碎区半径和裂隙区半径计算

由以上围岩应力场可以计算得到：

$$\sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) + \frac{1}{2}(\sigma_r - \sigma_\theta)\cos(2\beta) \tag{27}$$

$$\tau = \frac{1}{2}(\sigma_r - \sigma_\theta)\sin(2\beta) \tag{28}$$

式中： $\sigma_n$ 、 $\tau$  为裂纹法向应力和切向剪应力。 $\beta$  为裂缝倾角。

1.3.1 粉碎区半径  $r_c$  的计算

粉碎区半径判据为：

$$\sigma_r + p_w(r) = \sigma_{dc} \tag{29}$$

式中： $\sigma_{dc}$  为岩石动态抗压强度；一般可取  $\sigma_{dc} = (10\sim15)\sigma_{jc}$ <sup>[19]</sup>，本文计算采用参数为 10； $\sigma_{jc}$  为岩石静态抗压强度。

通过式 (29) 和式 (20) ~ (24) 计算出的围岩应力状态可以计算出围岩粉碎区半径  $r_c$ 。

1.3.2 裂隙区半径  $r_l$  的计算

水不耦合介质装药形成的围岩裂隙区，不同于炸药耦合装药与炸药空气不耦合装药形式。在水袋的爆裂形成新的水汽混合爆孔内压时，伴随产生爆生水汽流。爆生水汽在围岩内部沿裂隙传播，必然在裂纹尖端形成“水楔效应”。根据断裂力学，考虑爆生水汽流在裂纹尖端形成的附加应力强度因子。

裂隙区尖端应力强度因子：

$$K_I = K_I(\sigma_n) + K_I(p_w) \tag{30}$$

这里， $K_I(\sigma_n)$ 、 $K_I(p_w)$  是由裂纹法向应力  $\sigma_n$  和爆生水汽压力  $p_w$  产生的裂纹尖端应力强度因子。

$\sigma_n$  和爆生水汽产生的裂隙尖端强度因子<sup>[20]</sup>：

$$K_I(\sigma_n) = -\sigma_n\sqrt{\pi \cdot a} \tag{31}$$

$$K_I(p_w) = p_w\sqrt{\pi \cdot a} \tag{32}$$

式中： $a$  为裂纹初始长度的一半。

裂纹的起裂判据为：

$$K_I = K_I(\sigma_n) + K_I(p_w) = (p_w - \sigma_n) \cdot \sqrt{\pi \cdot a} = K_{Ic} \tag{33}$$

式中： $K_{Ic}$  为岩石的止裂韧度，一般情况下  $\sigma_{jc} = (55\sim82)K_{Ic}$ <sup>[21]</sup>，这里系数选为 70； $\sigma_{jc}$  为岩石静态抗压强度。

2 水不耦合装药爆破效果算例分析

取某隧道人工钻孔爆破施工为例，围岩岩性砂岩。爆破参数如下：炮孔长度为 3 m；TNT 装药爆破，炸药爆速  $D=6\,500\text{ m/s}$ ， $\rho_e=1.65\times10^3\text{ kg/m}^3$ ，装药半径  $r_0=0.025\text{ m}$ ，岩石密度为  $\rho_c=2.53\times10^3\text{ kg/m}^3$ ，抗压强度  $\sigma_{jc}=40\text{ MPa}$ ，抗拉强度  $\sigma_1=2.91\text{ MPa}$ ，剪切模量  $37.4\text{ GPa}$ ，泊松比为 0.2，岩石的纵波速度  $C_p=4\,390\text{ m/cm}^3$ 。空气密度为  $1.29\text{ kg/m}^3$ ，水的密度  $\rho_w=1.0\times10^3\text{ kg/m}^3$ ； $t_1=1\text{ ms}$ <sup>[22]</sup>。 $t_3=8\text{ ms}$ <sup>[22]</sup>。假设  $t_4=10\text{ ms}$ <sup>[2]</sup>，裂纹长度  $0.001\text{ m}$ ，裂纹倾角 $\beta=45^\circ$ 。

经验计算公式<sup>[23]</sup>：

$$\sigma_r = (\bar{r}) - \alpha \cdot p_{ml} \tag{34}$$

$$\sigma_\theta = \lambda \cdot \sigma_r \tag{35}$$

式中： $\bar{r}$  为距离炸药的有效距离， $\bar{r}=r/r_b$ ； $\alpha$  为应力波衰减系数， $\alpha=2\pm\lambda$ ； $\lambda$  为岩体侧压力系数， $\lambda=\mu_d/(1-\mu_d)$ ； $\mu_d$  为岩体动泊松比，工程中  $\mu_d=0.8\mu$ 。

粉碎区判定条件为式 (29)，裂隙区判定标准为：

$$\sigma_\theta > \sigma_{dl} \tag{36}$$

式中： $\sigma_{dl}$  为岩石动态抗拉强度， $\sigma_{dl}=M\sigma_1$ ； $\sigma_1$  为岩石静态抗拉强度， $M$  一般取值为 (3~4)。

2.1 轴向不耦合系数以及水和空气不耦合介质分别对爆破效果的影响

条件 1，装药形式为炸药和水时，本文公式计算半径；条件 2，装药形式为炸药和空气时，本文公式计算半径；条件 3，装药形式为炸药和水时，经验公式计算半径；条件 4，装药形式为炸药和空气时，经验公式计算半径。

图 3 为粉碎区半径  $r_c$  随轴向不耦合系数  $k_1$  的变化规律，从图中可以发现：本文计算得到的粉碎区半径较经验公式计算得到的粉碎区半径偏小。同时，不耦合装药情况的粉碎区半径  $r_c$  明显小于耦合装药的情况。

图 4 所示为裂隙区半径  $r_l$  随轴向不耦合系数  $k_1$  的变化情况，由图可知：空气不耦合介质装药时，当轴向不耦合系数在 1.2~1.8 时，本文计算公式较经验公式偏大；而在 0~1.2 和 1.8~3 情况下较经验公式偏小。不耦合介质为水时，当不耦合系数为 2 时裂隙区半径达到最小值；而不耦合

系数为3时达到最大值。最后,在相同的轴向不耦合装药系数下,水介质较空气介质具有明显的爆破增效作用。

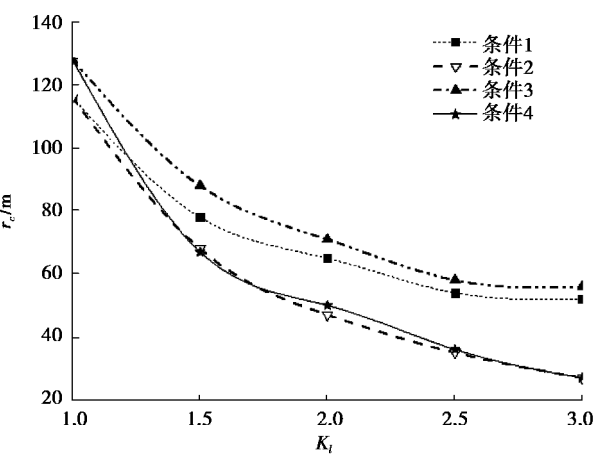


图3 粉碎区半径 $r_c$ 随轴向不耦合系数 $k_l$ 的变化关系  
Fig.3 Relationship between  $r_c$  and  $k_l$

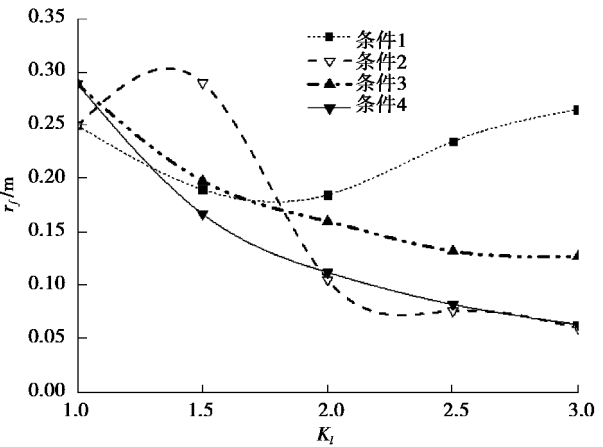


图4 裂隙区半径 $r_f$ 随轴向不耦合系数 $k_l$ 的变化情况  
Fig.4 Relationship between  $r_f$  and  $k_l$

2.2 轴向不耦合系数为2的情况下,水和空气介质分别对爆破效果影响的对比研究

图5和图6为当轴向不耦合装药系数为2时,水和空气不同耦合介质装药情况下,距离炮孔 $5r_0$ 和 $10r_0$ 处的径向应力 $\sigma_r$ 和 $\sigma_\theta$ 时程曲线图。从图中可以看出:在 $5r_0$ 和 $10r_0$ 处水不耦合介质装药情况下的轴向应力 $\sigma_r$ 和切向应力 $\sigma_\theta$ 峰值明显大于空气介质。结果表明:在轴向不耦合系数为2时,水介质较空气具有更明显的爆破增效作用。

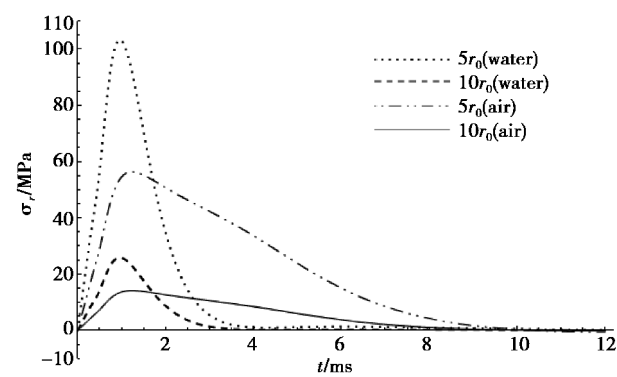


图5  $\sigma_r$ 随时间 $t$ 的变化  
Fig.5 Relationship between  $\sigma_r$  and  $t$

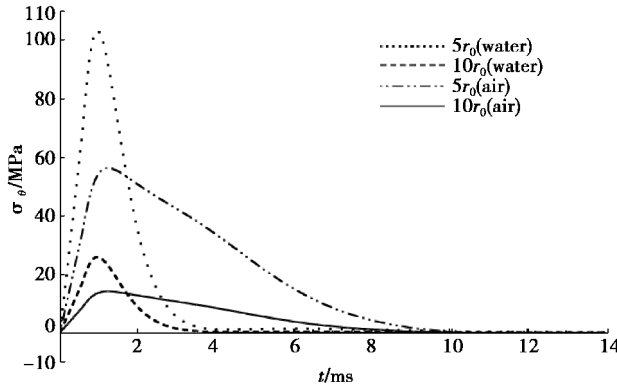


图6  $\sigma_\theta$ 随时间 $t$ 的变化  
Fig.6 Relationship between  $\sigma_\theta$  and  $t$

如图7所示为轴向不耦合系数为2时,围岩内部任意一点的径向应力 $\sigma_r$ 峰值随距离炮孔中心距离变化的规律。由图可知:水介质时的围岩入射峰值压力明显大于空气介质情况。

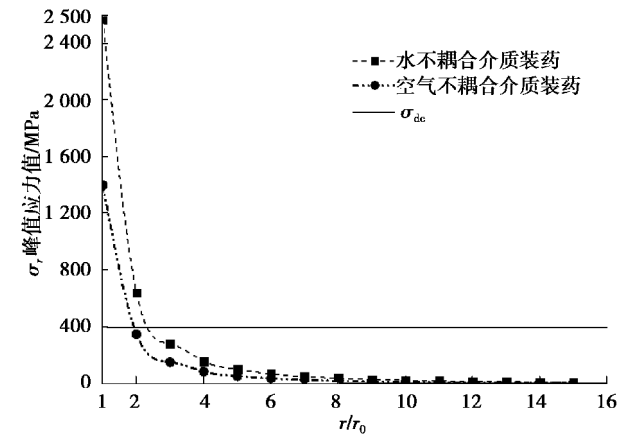


图7  $\sigma_r$ 峰值随 $r/r_0$ 的变化情况  
Fig.7 Relationship between the peak of  $\sigma_r$  and  $r/r_0$

图8中为轴向不耦合系数为2时,空气和水不耦合介质分别装药情况下,围岩不同部位裂缝尖端

应力强度因子  $K_I$  随距离炮孔中心距离的变化规律。从图发现:水不耦合介质装药情况下的起裂区半径明显大于空气不耦合装药情况下。

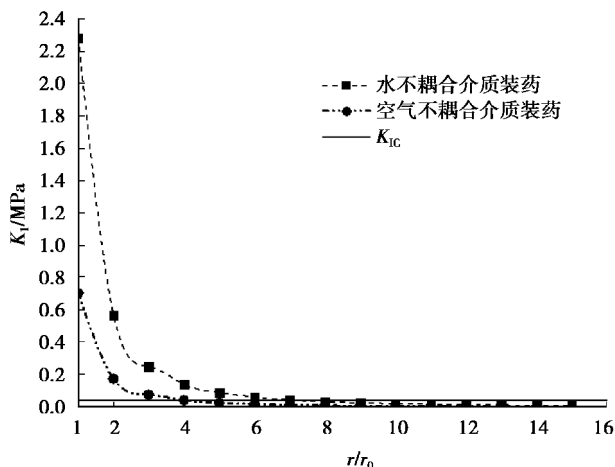


图8  $K_I$  随  $r/r_0$  的变化情况

Fig.8 Relationship between  $K_I$  and  $r/r_0$

### 3 结论

针对耦合、空气不耦合和水不耦合装药优选问题,提出了固液气三相爆破计算模型。通过模型推导分析,最终得到如下结论:

(1)相同装药炮孔半径条件下,不耦合装药比耦合装药有效降低了围岩入射压力值;耦合装药的粉碎区半径  $r_c$  为最大,水不耦合装药次之,空气不耦合装药最小;对于三者的裂隙区半径  $r_f$  有较大的差别,随着轴向不耦合系数的改变,三者出现了相互交错的现象。

(2)轴向不耦合系数在 1.6~3 时,水介质装药才会比空气介质装药更具有增效破岩的效果。而当轴向不耦合系数为 3 时,水介质裂隙区半径  $r_f$  比空气的  $r_f$  差值达到最大,前者约为后者的 4 倍。

(3)当轴向不耦合系数为 2 时,水不耦合介质装药的裂隙区半径  $r_f$  约为空气不耦合介质的 2 倍。

### 参考文献 (References)

[1] 宗琦.装药结构对孔壁压力影响的理论探讨[J].矿冶工程, 2006, 26 (5): 9-12. (Zong Qi. Theoretical analysis of charge structure's influence on pressure on bore wall [J]. Mining and Metallurgical Engineering,

2006, 26(5): 9-12. (in Chinese))

- [2] 钟明寿,龙源,李兴华,等.基于炮孔不同耦合介质的孔壁爆炸载荷及比能时间函数分析[J].振动与冲击, 2011, 30 (7): 116-119. (Zhong Mingshou, Long Yuan, Li Xinghua, et al. Time function for borehole explosive loading and specific energy based on different coupling mediums [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 116-119. (in Chinese))
- [3] 管少华,蒲传金,肖定军,等.偏心不耦合装药爆破裂纹扩展实验研究[J].爆破, 2015, 32 (1): 16-21. (Guan Shaohua, Pu Chuanjin, Xiao Dingjun, et al. Experimental study on crack propagation under eccentric decouple charge structure [J]. Blasting, 2015, 32 (1): 16-21. (in Chinese))
- [4] 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. Time function for borehole explosive loading and specific energy based on different coupling mediums [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 207-211. (in Chinese))
- [5] Rossmannith H P, Daehnke A, Knasmüllner R E, et al. Fracture mechanics applications to drilling and blasting [J]. Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures, 1997, 20(11): 1617-1636.
- [6] 孙磊,任庆峰,宗琦.水不耦合装药结构在煤矿井巷掘进光面爆破中的应用[J].爆破, 2010, 27 (3): 25-28. (Sun Lei, Ren Qingfeng, Zong Qi. Application of water-decoupled charge in smooth blasting of coal mine rock tunnel [J]. Blasting, 2010, 27 (3): 25-28. (in Chinese))
- [7] 明锋,祝文化,李东庆.水耦合装药爆破在隧道掘进中的应用[J].爆破, 2012, 8 (5): 1008-1013. (Ming Feng, Zhu Wenhua, Li Dongqing. Application of water-couple charge blasting in tunnel excavation [J]. Blasting, 2012, 8(5): 1008-1013. (in Chinese))
- [8] 杨仁树,王雁冰.切缝药包不耦合装药爆破爆生裂纹动态断裂效应的试验研究[J].岩石力学与工程学报, 2013, 32 (7): 1337-1343. (Yang Renshu, Wang Yanbing. Experimental study of dynamic fracture effect of blasting crack in slotted cartridge decoupling charge blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1337-1343. (in Chinese))
- [9] 高保彬,刘云鹏,王祖洸.不同耦合装药结构的爆破效

- 果分析[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2014,29(3):10-14.(Gao Baobin, Liu Yunpeng, Wang Zuguang. Analysis of blasting effect under different coupling charge structure [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2014, 29(3): 10-14. (in Chinese))
- [10] 曾晶,卜杉杉.爆破技术在石油勘探中的应用[J].科技创新与生产力,2015(5):101-103.(Zeng Jing, Bu Shanshan. Blasting technology application in petroleum exploration [J]. Sci-tech Innovation and Productivity, 2015(5): 101-103. (in Chinese))
- [11] 夏彬伟,刘承伟,卢义玉,等.缝槽水压爆破导向裂缝扩展实验研究[J].煤炭学报,2016,41(2):432-438.(Xia Binwei, Liu Chengwei, Lu Yiyu, et al. Experimental study of propagation of directional fracture with slotting hydraulic blasting [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(2): 432-438. (in Chinese))
- [12] 闫国斌,于亚伦.空气与水介质不耦合装药爆破数值模拟[J].工程爆破,2009,15(4):13-19.(Yan Guobin, Yu Yalun. Numerical simulation of air and water medium decoupling charge blasting [J]. Engineering Blasting, 2009, 15(4): 13-19. (in Chinese))
- [13] 过江,崔文强,陈辉.不同耦合介质光面爆破裂纹发展数值分析[J].黄金科学技术,2016,24(1):68-75.(Guo Jiang, Cui Wenqiang, Chen Hui. Numerical analysis of the smooth blasting crack development under different coupling medium [J]. Gold Science and Technology, 2016, 24(1): 68-75. (in Chinese))
- [14] 冯宇峰.基于LS-DYNA的预裂爆破硬夹矸弱化技术研究[J].地下空间与工程学报,2016,12(增2):726-732.(Feng Yufeng. Research on weakening technology of hard dirt band presplitting blasting based on LS-DYNA [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(Supp.2): 726-732. (in Chinese))
- [15] 徐颖,宗琦.光面爆破软垫层装药结构参数理论分析[J].煤炭学报,2000,25(6):610-613.(Xu Ying, Zong Qi. Theoretical analysis on the parameters of smooth blasting soft mat layer charging construction [J]. Journal of china coal society, 2000, 25(6): 610-613. (in Chinese))
- [16] 杨桂通,张善元.弹性动力学[M].北京:中国铁道出版社,1988.(Yang Guitong, Zhang Shanyuan. Elastodynamics [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988. (in Chinese)).
- [17] Stehfest H. Algorithm 368 numerical inversion of laplace transforms [J]. Communications of ACM, 1970, 13(1): 47-49.
- [18] Stehfest H. Remark on algorithm 368 numerical inversion of laplace transforms [J]. Communications of ACM, 1970, 13(10): 624-625.
- [19] 宗琦,李永池,徐颖.炮孔水耦合装药爆破孔壁冲击压力研究[J].水动力学研究与进展,2004,19(5):610-615.(Zong Qi, Li Yongchi, Xu Ying. Preliminary discussion on shock pressure on hole wall when water-couple charge blasting in the hole [J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 19(5): 610-615. (in Chinese))
- [20] 岳崇光.基于爆生裂缝的多水压裂缝扩展规律研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.(Yue Chongguang. Research on propagation law of multiple hydraulic cracks based on blasting cracks [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese)).
- [21] Cai M, Kaiser P K, Tasaka Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2004, 41(5): 833-847.
- [22] 张玉柱,卢文波,陈明等.爆炸应力波驱动的岩石开裂机制[J].岩石力学与工程学报,2014,33(增1):3144-3149.(Zhang Yuzhu, Lu Wenbo, Chen Ming, et al. Rock cracking mechanism driven by explosive stress wave [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (Supp. 1): 3144-3149. (in Chinese))
- [23] 万梁龙.水不耦合装药爆破粉碎区及初始裂隙区半径计算[J].福建建设科技,2012(4):8-9.(Wang Lianglong. Calculation of the pulverizing and initial crack area radius in water-uncoupling blasting [J]. Fujian Construction Science & Technology, 2012(4): 8-9. (in Chinese))