

水压爆破中波衰减规律及致裂机理的理论研究

邵珠山¹, 杨跃宗¹, 米俊峰², 赵凡²

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 中铁十二局集团第一工程有限公司, 陕西 西安 710038)

摘要: 水压爆破是一种使岩石破碎更为均匀的科学高效的爆破方法。水压爆破岩石的整个过程可细分为四个部分: 水中冲击波的形成及传播、冲击波在水和岩石界面上的反射和透射、应力波在岩体中的传递及衰减、应力波的作用造成岩石破裂。通过对水压爆破整个过程的理论分析, 得到了冲击波在水中的传播规律、孔壁处冲击压力和与不耦合系数的关系、岩石质点位移随质点距爆心距离的变化规律以及岩石在应力波作用下的破裂机理和破裂区的范围, 这些规律将为后期的试验研究和数值分析研究提供参考。

关键词: 水压爆破; 冲击波; 不耦合系数; 应力强度因子

中图分类号: TB41

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)06-0820-07

Theoretical study on the wave attenuation law about water pressure blasting

SHAO Zhushan¹, YANG Yuezhong¹, MI Junfeng², ZHAO Fan²

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055;

2. The 1st Engineering Co. Ltd. of China Railway 12th Bureau Group, Xi'an 710038, China)

Abstract: The water pressure blasting is a kind of scientific and effective blasting method that makes the rock broken more uniform. In this paper, the whole process of the water pressure blasting was subdivided into four parts: the formation and spread of shock wave in water, the reflection and transmission of shock waves in the water and rock interface, the transmission and attenuation of stress wave in rock mass, and the effect of stress wave causing rock burst. The rule of each process is analyzed in theory. Moreover, the propagation law is acquired of shock wave in water, the relation of shock wave pressure and no coupling coefficient in hole wall, the law of rock particle displacement with the distance from blasting center and the zone of rock failure. The rule provides reference for later experiment research and numerical analysis study.

Key words: water pressure blasting; blast wave; uncoupling coefficient; stress intensity factor

目前, 钻爆法仍是隧道开挖施工过程中最主要的掘进方式。按照常规施工方法有两种装药方式, 一种是采用耦合装药, 即炸药与炮眼孔壁之间紧密接触; 另一种是不耦合装药, 即炸药与炮眼孔壁之间保留一定的间隙, 通常间隙内为空气。炸药爆炸过程是一个高速、高压和高温的释放过程, 爆炸产生的压力可以达到几十个大气压, 并在极短的时间内以每秒几千米的速度猛烈冲击岩石, 岩石在这种超动荷载的作用下, 离炸药近的岩石遭受粉碎破坏, 而远离炸药的岩石由于应力波强度的迅速衰减和作用时间不足, 常常会产生超过允许尺寸的大块。水压爆破是一种使岩石破碎更为均匀的科学高效的爆破方法。该方法是将炸药放置在受约束的有限水域内, 用水作为传递

爆炸能量和压力的介质, 由于水的缓冲作用和均匀传递压力的作用, 爆炸产生的压力作用时间长、应力应变峰值高, 并可以平缓而均匀的作用在周围岩体上, 使岩体均匀破碎。

国内外学者对水压爆破的原理做了不少的理论分析、试验验证和数值模拟, 并把一些成果应用于工程实践。陈士海、林从谋^[1]基于水压爆破孔壁围岩的应力场, 指出了水压爆破不产生粉碎区时的最佳不耦合系数和粉碎区半径的计算方法。吴新霞^[2]理论分析了圆筒容器状构筑物受到爆破作用的动力响应, 探讨了水压控制爆破机理, 提出了水压控制爆破药量计算公式。崔云航等人^[3]从水压爆破的受力分析入手, 利用工程力学中的壳体理论, 对水压爆破中的药量计算公式进行了推导,

收稿日期: 2016-12-16

修改稿日期: 2017-11-14

第一作者: 邵珠山(1968—), 男, 博士, 教授, 博导。主要从事地下工程防灾减灾、动态设计理论与施工技术、地下工程多场耦合理论方面的研究工作。E-mail: shaozhushan@xauat.edu.cn

并应用于实践,验证了它的有效性.潘国斌、林大能^[4]通过各因素对水压爆破破坏程度的试验研究,发现壁体厚度对水压爆破破坏程度影响显著,气泡脉动对水压爆破破坏程度有影响,在分析水压爆破机理时不能忽略气泡的脉动作用.林德余、马万昌等^[5]通过高速摄影拍摄的模型爆破过程照片和岩石爆破的块度分析,论述了水垫层在深孔爆破中对爆破效果的作用.王林^[6]通过分析炸药在水中爆炸后形成的冲击波和气泡,研究了水中冲击波的传播规律和气泡上升的引起的二次压力脉冲,并提出了在水压爆破中装药量和注水深度的参数确定方法.J. Adachi、E. Siebrits 等^[7]通过试验研究水压爆破中应力场的分布,讨论了岩石破裂的发展规律并得到了裂缝增长随时间变化的函数关系.Bingxiang Huang、Pengfeng Li^[8]通过应用真三轴水力致裂模拟实验发现:水压致裂的范围为以钻孔为中心的椭圆;沿该实验模型轴向的破裂范围空间形态为广口瓶状,且可分为三个区域:爆破冲击区、轴向扩展区、孔口影响区.L. C. Li^[9]通过建立反映岩石细观损伤演化过程的渗流-应力-损伤三维耦合模型分析发现:岩石的应力状态将影响裂纹扩展的形式和走向以及裂纹的空间分布形态.颜事龙^[10]采用有限元软件 LS-DYNA 数值模拟了水中爆炸冲击波正入射冲击孔壁的情况下,孔壁岩面上的初始透射压力和由其形成的炮孔周围岩石中的粉碎区、裂隙区范围,结果表明:随着不耦合系数的增加,有效应力降低,但作用时间长、衰减慢.

本文在已有研究成果的基础上把水压爆破岩石的整个过程细分为四个部分:水中冲击波的形成及传播、冲击波在水和岩石界面上的反射和透射、应力波在岩体中的传递及衰减、应力波的作用造成岩石破裂,并对整个过程的规律进行了更为深入、系统理论的分析,进而为后期的试验研究和数值分析研究提供参考.

1 基本理论

1.1 水中冲击波的形成及传播规律

冲击波是一种超声速的强烈压缩波.炸药在水介质中爆炸时,瞬间产生高温高压的爆轰产物,在周围的水体中产生水中冲击波并迅速向外传播^[11].波阵面通过介质前后的参数将发生突跃变化,由于此变化时间极短^[12],在理论上可认为该变化是不连续的.设图1所示冲击波的波阵面以波速 D 向右侧传播,波前介质的状态参数为 P_0 、 ρ_0 、

E_0 、 u_0 ,波后介质的状态参数为 P_1 、 ρ_1 、 E_1 、 u_1 ,其中 P 、 ρ 、 E 、 u 分别表示水介质的压力、密度、内能和质点速度.以波阵面为参照系,则波前介质的速度为 $(D-u_0)$,波后介质的速度为 $(D-u_1)$,速度的方向如图1所示.

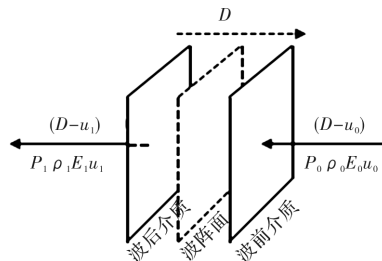


图1 动坐标下的冲击波状态参数

Fig. 1 The shock wave state parameter in dynamic coordinate

在水未扰动之前速度为0,在 $u_0 = 0$ 的条件下,水中冲击波满足三个守恒方程:

质量守恒方程

$$\rho_0 D = \rho_1 (D - u_1) \quad (1)$$

动量守恒方程

$$P_1 - P_0 = \rho_1 D u_1 \quad (2)$$

能量守恒方程

$$E_1 - E_0 = \frac{1}{2} (P_1 + P_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_1} \right) \quad (3)$$

由(1)、(2)联立可得

$$D = \sqrt{\left(\frac{\rho_1}{\rho_0} \right) \frac{P_1 - P_0}{\rho_1 - \rho_0}} \quad (4)$$

$$u_1 = \frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_1} D \quad (5)$$

库尔^[13]基于水中爆炸冲击波的相似性并结合大量试验结果,提出在药量一定时,在离爆心不同位置 R 处的冲击波峰值应力 $P_{1,\max}$ 的可以按照指数规则近似算出:

$$P_{1,\max} = A \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (6)$$

式中: W 为炸药装药量; A 、 α 为由试验测定的参数,不同的炸药取值不同.

炸药装药量 W 的值^[13]取为

$$W = \frac{1}{4} \pi d_e^2 \rho_e \frac{Q_E}{Q_T} \quad (7)$$

式中: d_e 为圆柱形药卷直径; ρ_e 为炸药密度; Q_E 为所用炸药爆热; Q_T 为 TNT 炸药的爆热,取 4 200 kJ/kg.

定义衰减时间常数 θ 为某一位置处冲击波压力从峰值压力 $P_{1,\max}$ 衰减到 $P_{1,\max}/e$ 时所经历的时间, e 为自然对数的底数, e 可取为 2.72. 在规定的时间

间段 θ 内, 压力也呈指数的变化规律^[13]:

$$P_i(t) = P_{1,\max} e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (8)$$

把(6)代入(8)便可以知道冲击波在水中传播时, 任意位置、任意时刻的压力。

设炮孔的半径为 b , 当水中冲击波作用于炮孔壁时, 其入射压力的初始应力为

$$P_b = A \left(\frac{W^{1/3}}{b} \right)^a \quad (9)$$

定义炮孔装药不耦合系数:

$$K = \frac{b}{\frac{1}{2}d_e} \quad (10)$$

联立(7)、(9)和(10)得, 水中冲击波在孔壁处产生的入射压力的初始应力为

$$P_b = AK^{-a} \left(\frac{2\pi\rho_e Q_E}{d_e Q_T} \right)^{a/3} \quad (11)$$

1.2 冲击波在水和岩石界面上的反射和透射

冲击波从水介质进入岩石介质时, 在水和岩石界面上将发生反射和透射, 如图2所示, 其中用 I 表示入射波, R 表示反射波, T 表示透射波。当入射冲击波 σ_1 到达水和岩石的界面时, 由于两种介质的波阻抗不同, 分别为 $\rho_1 c_1$ 和 $\rho_2 c_2$, 波冲击波在岩石中产生透射波 σ_T , 在水介质中产生反射波 σ_R ^[16], 其中, c_1 、 c_2 分别为冲击波在岩石和水中的波速。

根据波阵面上的动量守恒方程可得:

$$\begin{cases} u_1 = -\frac{\sigma_1}{\rho_1 c_1} \\ u_R = \frac{\sigma_R}{\rho_1 c_1} \\ u_T = -\frac{\sigma_T}{\rho_2 c_2} \end{cases} \quad (12)$$

式中: u_1 , u_R 分别表示冲击波的入射波和反射波引起的界面左侧水体的质点速度, u_T 表示冲击波的透射波引起的界面右侧岩体的质点速度。

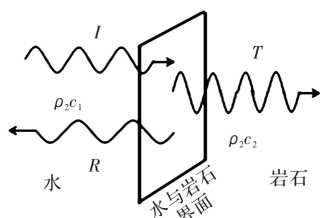


图2 冲击波在界面处的反射和透射

Fig. 2 The reflection and transmission of shock wave in the interface

根据叠加原理以及界面两边的连续条件, 可得

$$\begin{cases} \sigma_1 + \sigma_R = \sigma_T \\ u_1 + u_R = u_T \end{cases} \quad (13)$$

联立(12)、(13)求解得:

$$\begin{cases} \sigma_R = F\sigma_1 \\ u_R = -Fu_1 \\ \sigma_T = T\sigma_1 \\ u_T = \left(\frac{\rho_1 c_1}{\rho_2 c_2} \right) Tu_1 \end{cases} \quad (14)$$

式中: F 和 T 分别称为反射系数和透射系数, 其值由两种介质的波阻抗确定:

$$\begin{cases} F = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \\ T = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \\ T = 1 + F \end{cases} \quad (15)$$

由于水的阻抗 $\rho_1 c_1$ 小于岩石的阻抗 $\rho_2 c_2$, $F > 0$, 且 $T > 0$, 反射波的应力和透射波应力均与入射波应力同号, 即入射压缩波经反射和透射后仍为压缩波。

1.3 岩体中的应力波传递及衰减规律

水中冲击波到达孔壁时发生反射和透射, 在水介质中形成反射波, 同时在孔壁周围的岩体中形成透射波。由(14)和(15)知透射波的应力:

$$\sigma_T = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \sigma_1 \quad (16)$$

设炮孔的半径为 b , 把 $R=b$ 代入(6)和(8)得到作用在孔壁上冲击波的入射应力:

$$\sigma_1 = P_1(t) |_{R=b} = A \left(\frac{W^{1/3}}{b} \right)^a \cdot e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (17)$$

由(16)可得冲击波在孔壁处的透射波初始压力 P_c 为

$$P_c = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} P_b \quad (18)$$

式中: ρ_1 、 c_1 分别为水的密度和冲击波在水中的波速; ρ_2 、 c_2 分别为岩体的密度和冲击波在岩体中的波速。 c_1 可根据波的基本方程和冲击波作用下水的状态方程^[11]联合求解:

$$c_1 = \sqrt{\frac{P_b}{\rho_1} \left[1 - \left(\frac{P_b}{B} + 1 \right)^{-1/\beta} \right]^{-1}} \quad (19)$$

式中: B 和 β 均为常数, $B=394$ MPa, $\beta=8$ 。

冲击波在岩石的传播过程中, 其物理参数(位移、质点速度、应变和应力)随着传播距离的增大而减小, 根据弹性力学理论可得岩体中径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ ^[14]:

$$\begin{cases} \sigma_r = \sigma_1 \left(\frac{r}{b} \right)^{-\beta} \\ \sigma_\theta = \zeta \sigma_1 \left(\frac{r}{b} \right)^{-\beta} \\ \beta = 2 + \frac{2\mu}{1-\mu} \end{cases} \quad (20)$$

式中: b 为炮孔半径; r 为计算点距起爆点距离; β 为冲击波衰减指数; ζ 为侧向应力系数; μ 为岩石的泊松比。

柱状药包在炮孔中爆炸时, 可将问题简化为轴对称、线弹性的平面应变问题, 在炸药爆炸时在弹性介质中激发的弹性波^[15]可表示为

$$\begin{cases} \sigma_r(r, t) = (\lambda + G) \frac{\partial U}{\partial r} + \lambda \frac{U}{r} \\ \sigma_\theta(r, t) = \lambda \frac{\partial U}{\partial r} + (\lambda + G) \frac{U}{r} \end{cases} \quad (21)$$

式中: U 为岩石质点的质点位移, λ 和 G 为拉梅常数, $\lambda = \frac{\mu E}{(1+\mu)(1-2\mu)}$, $G = \frac{E}{2(1+\mu)}$, E 为弹性模量, μ 为泊松比。

联立(20)(21)可得 U 对 r 的一阶非线性微分方程

$$\frac{\partial U}{\partial r} + M \cdot \frac{1}{r} \cdot U = N \cdot \left(\frac{b}{r}\right)^\beta \quad (22)$$

式中: $M = \frac{\lambda}{\lambda + 2G}$; $N = \frac{\sigma_1}{\lambda + 2G}$ 。

求解微分方程(22)得

$$U = \frac{C}{r^M} + \frac{b^\beta}{r^{\beta-1}} \cdot \frac{N}{M-\beta+1} \quad (23)$$

式中: C 为常数, 由初始条件确定。

由式(23)便可知岩石介质中的某质点位移与该质点距爆心的距离的对应关系。

1.4 岩体破坏判据

岩石在爆破荷载作用下, 根据破碎的程度不同可分为破碎区、裂隙区、松动区三个区域。岩体在长期的内力和外力作用之下, 其构成矿物颗粒边界之间出现的微小天然裂缝^[16], 导致岩石内部存在许多初始的微观裂纹。在外荷载作用下, 这些微观裂纹的扩展是导致在岩石宏观破碎的原因, 故要研究岩石的破坏判据, 就要对岩石的微观裂纹进行分析。取岩石中距炮孔中心距离为 r 处的裂纹单元, 裂纹的初始长度为 $2a$, 裂纹倾角为 ω , 翼裂纹开裂角度为 γ , 如图3所示。

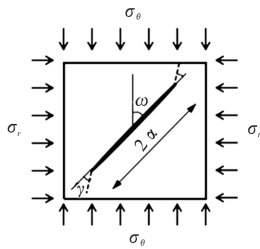


图3 裂纹模型示意图

Fig. 3 A model for the crack

作用于裂纹平面的正应力 σ_n 、剪应力 τ 分别为

$$\begin{cases} \sigma_n = \frac{1}{2}(\sigma_r + \sigma_\theta) + \frac{1}{2}(\sigma_\theta - \sigma_r)\cos(2\omega) \\ \tau = \frac{1}{2}(\sigma_\theta - \sigma_r)\sin(2\omega) \end{cases} \quad (24)$$

有关文献^[17]对爆炸应力波驱动的岩石分区开裂机制进行了研究, 取距爆心一定距离的某质点, 在分析该点径向应力和环向应力的基础上发现, 岩石介质中某一点在时间上的应力变化分为三个阶段: 压剪应力状态(径向压应力与环向压应力组合)、拉剪应力状态(径向压应力和环向拉应力组合)、拉剪应力状态(径向拉应力和环向拉应力组合), 并且推导出了压剪应力条件下的应力强度因子为

$$K_I = \sqrt{\frac{\pi a}{3}} \sigma_r L \quad (25)$$

式中: $L = (1-k)[\sin(2\omega) - \eta\cos(2\omega)] - \eta(1+k)$, $k = \sigma_\theta/\sigma_r$, η 为裂纹面摩擦系数。

将式(17)和(20)代入式(25), 可得:

$$K_I = \sqrt{\frac{\pi a}{3}} A \left(\frac{W^{1/3}}{b}\right)^a \left(\frac{r}{b}\right)^{-\beta} L \quad (26)$$

拉剪应力条件下的应力强度因子为

$$K_I = \frac{\sqrt{\pi a}}{2} \sigma_r Q \quad (27)$$

式中:

$$Q = \cos^3 \frac{\theta_0}{2} [(1+k) + (1-k)\cos(2\omega)] -$$

$$3\cos^2 \frac{\theta_0}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} (1-k)\sin(2\omega)$$

其中, θ_0 为翼裂纹初始扩展方向。

将式(17)和(20)代入式(27), 可得:

$$K_I = \frac{\sqrt{\pi a}}{2} A \left(\frac{W^{1/3}}{b}\right)^a \left(\frac{r}{b}\right)^{-\beta} Q \quad (28)$$

根据临界强度因子 K_{Ic} 与岩石抗拉强度 σ_c 的统计关系^[17], 在 K_{Ic} 和 σ_c 均采用国际单位制的基本单位时, $\sigma_c = (55-82)K_{Ic}$, 我们取 $\sigma_c = 70K_{Ic}$ 。在岩石的某一位置处, 如若满足 $K_I > K_{Ic}$, 即可认为该位置的裂纹扩展, 岩石破裂。

2 参数选取

基于上述理论模型, 同时也为后期模型试验和数值分析提供一些参考, 我们选取 TNT 炸药药包的直径为 1 cm, 几何尺寸为 40 cm × 40 cm × 40 cm 的正方体岩体为计算模型, 炮孔直径根据分析所需要的不耦合系数确定。选取老鼻山隧道的玄武岩作为研究的岩体, 经实验对其物理力学性质测定获得其参数, 见表1。炸药选取的 TNT 炸

药, 参照相关文献[18-19]选取了其爆炸参数, 见表2。

表1 岩石物理力学性质参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of the rock

密度	抗压强度	抗拉强度	弹性模量	泊松比	纵波波速	横波波速	波阻抗
ρ_c	σ_c	σ_t	E	μ	C_P	C_S	$\rho \cdot C$
2.95 g/cm ³	211.2 MPa	23.5 MPa	8.35 GPa	0.285	4 690 m/s	3 924 m/s	13 835 g · m/cm ³ · s

表2 TNT炸药爆炸性能参数

Tab. 2 The explosive parameters of TNT

密度 ρ_e	爆速 D_e	爆热 Q_E	爆轰压力 P_j
1.5 g/cm ³	7 000 m/s	4 230 kJ/kg	200 kPa

3 水压爆破研究

3.1 冲击波在水中的传播规律

炸药爆炸是一个能量瞬间释放的过程, 作用时间短且作用强度大, 这些特征导致炸药在水中爆炸产生的冲击波在水中引起的应力很难通过试验手段测得, 所以, 目前还是主要通过理论分析和数值模拟进行研究。在此, 我们定义物理量 ξ :

$$\xi = \frac{R}{\frac{1}{2} \cdot d_e} \quad (30)$$

式中, R 为测试点距爆心距离。

结合选取的炸药类型为 TNT, 整理相关文献[12-13]中对(6)式中 A 和 α 的测得的取值, 见表3。选取系数 A 为 52.5 MPa, 衰减系数 α 为 1.13, 由式(8)可得冲击波的应力随距离的衰减规律以及不同位置测试点的冲击波应力随时间的衰减规律。

表3 TNT炸药的 A, α 值

Tab. 3 The A, α values of TNT

序号	A	α	来源
1	52.3	1.13	库尔
2	52.4	1.13	NSWC
3	52.5	1.19	中科院力学所
4	52.646	1.102	海军某部

由图4可知, 水中爆炸冲击波在不同的 ξ 处引起的应力对时间有相同的变化规律, 均为先在极短的时间内快速减弱, 然后再缓慢减小。

3.2 孔壁处冲击波压力与不耦合系数的关系

在计算模型中, 水的密度 ρ_1 取 1 kg/m³, 通过计算知在孔壁处入射波的初始压力 P_b 为 122.45 MPa, 代入式(19)求得 c_1 为 1 926.20 m/s。将式(11)代入式(18)可得:

$$P_c = 2AK^{-\alpha} \frac{\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \left(\frac{1}{4} \frac{\pi \rho_e Q_E}{d_e Q_T} \right)^{\alpha/3} \quad (29)$$

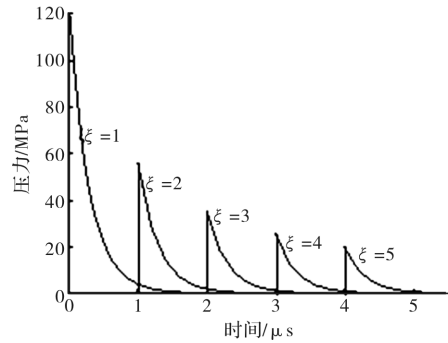


图4 冲击波在水中的传播规律

Fig. 4 The propagation law of shock wave in water

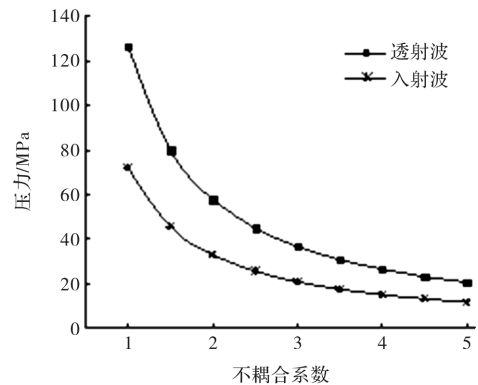


图5 冲击波压力与不耦合系数的关系

Fig. 5 The relationship Shock wave pressure and the coupling coefficient

由上式可知, 在岩体条件一定时, 岩体中的初始应力随装药的不耦合系数增大呈指数型减小。装药条件一定时, 岩体的波阻抗越大, 岩体中的初始应力越大。由图5知, 随着不耦合系数增大, 水中冲击波作用于孔壁的入射初始压力和透射初始压力变化规律相同, 均呈指数型衰减; 冲击波产生的透射波压力要大于入射波压力, 且随着不耦合系数的增大, 两者的差值越来越小。

3.3 岩石质点位移的变化规律

把表1中岩石的弹性模量 E 和泊松比 μ 代入拉梅常数的计算公式, 可得 $\lambda = 4.30$ GPa, $G = 3.25$ GPa, 进而可得 $M = 0.40$, $N = 0.011$ 。由式(12)、(14)和(15)可得孔壁处岩石质点的运动速度 $u_R = 10.38$ m/s, 进而可得位移 U 的初始值为 5.19×10^{-6} m, 代入式(23)可解得 $C = 7.49 \times 10^{-}$

6.8 m^{1.4}. 将已经求得的参数反带入式(23), 并引入不耦合系数, 便可得到不同耦合系数时 U 随 r 变化的规律. 如图 6, 对应不耦合系数为 1、3、5, 岩石质点的位移均随着该质点距离爆心的距离增大逐渐减小, 且随着不耦合系数的增大, 质点位移的变化范围变小. 在距离炮孔较近的一定范围内, 按不耦合系数大的装药方式爆破所引起的质点位移要小于不耦合系数小的; 在距离炮孔较近的一定范围内, 按不耦合系数大的装药方式爆破所引起的质点位移要大于不耦合系数小的. 一定不耦合系数范围内, 爆破所采用的不耦合系数越大, 在爆破的影响区域引起的岩石质点位移更为均匀, 即岩石破碎更为均匀.

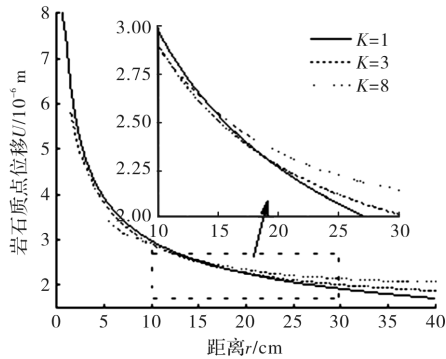


图 6 岩石质点位移随距离的变化

Fig. 6 The rock particle displacement along with the change of the distance

3.4 岩石破裂区范围

岩石在一定的应力条件下, 其强度因子与裂纹所处的应力状态、裂纹角度 ω 、裂纹长度 $2a$ 以及裂纹间摩擦系数 η 等有关. 根据老鼻山隧道玄武岩的力学试验, 可获得相关的细观力学参数, 见表 4.

表 4 岩石细观力学参数

Tab. 4 Micromechanical parameters of the rock

参数	取值
临界强度因子 K_{lc}	1.73 MPa · m ^{1/2}
裂纹间摩擦系数 η	0.41
初始裂纹尺寸 a	2.55 mm
裂纹角度 ω	45°

本例中, 选取不耦合系数 $K=3$, 我们把相关的参数代入式(26)、(27), 便可得到距离爆心不同距离处的应力强度因子, 如图 7 所示, 再把不同位置的应力强度因子与该岩石的临界应力强度因子比对, 便可得出岩石在该应力条件下的破裂范围. 在我们的计算模型中, 岩石的压剪破坏范围为距爆心 4.2 cm 的范围内(约为 1.7 倍的炮孔半

径), 岩石的拉剪破坏范围为距爆心 4.2~6.8 cm 的范围内(约为 2.7 倍的炮孔半径).

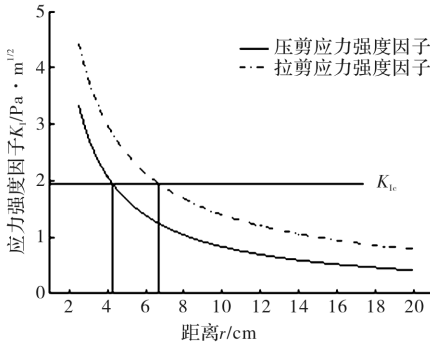


图 7 应力强度因子随距离的变化

Fig. 7 The stress intensity factor along with the change of the distance

4 结论

通过对水压爆破相关理论的推导, 我们对水压爆破整个过程的一些规律进行了分析, 得到以下结论:

(1) 定义了无量纲的物理量 ξ , 分析发现冲击波在不同的 ξ 处引起的应力对时间有相同的变化规律, 均为先在极短的时间内快速减弱, 然后再缓慢减小.

(2) 随着不耦合系数增大, 水中冲击波作用于孔壁的入射初始压力和透射初始压力变化规律相同, 均呈指数型衰减. 冲击波产生的透射波压力要大于入射波压力, 且随着不耦合系数的增大, 两者的差值越来越小.

(3) 冲击波引起的岩石质点位移距离爆心的距离增大呈指数型减小. 一定不耦合系数范围内, 爆破所采用的不耦合系数越大, 岩石破碎越均匀.

(4) 基于岩石细观力学, 在选取的计算模型中, 选取不耦合系数为 3 时, 岩石的破裂区的直径约为 2.7 倍的炮孔直径, 其中, 压剪破坏区直径为 1.7 倍的炮孔直径, 拉剪破坏区直径为 1.7~2.7 倍的炮孔直径.

参考文献 References

[1] 陈士海, 林从谋. 水压爆破岩石的破坏特征[J]. 煤炭学报, 1996, 01: 24-29.
CHEN Shihai, LIN Congmou. Features of rock fragmented by water blasting. [J]. Journal of China Coal Society, 1996, (1): 24-29.
[2] 吴新霞. 圆筒形容器状构筑物水压控制爆破机理及药量公式[J]. 爆炸与冲击, 1988, 02: 106-112.
WU Xinxia. Collapse mechanism and charge weight

- calculation formula of hydraulic pressure controlled blasting for cylindrical containers[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1988, (2): 106-112.
- [3] 崔云航, 吴腾芳, 朱立新, 等. 壳体理论在水压爆破中的应用[J]. *爆破*, 2002, 19(2): 54-56.
CUI Yunhang, WU Tengfang, ZHU Lixin, et al. Application of the shells theory in hydraulic blasting[J]. *Blasting*, 2002, 19(2): 54-56.
- [4] 潘国斌, 林大能. 水压爆破破坏程度影响因素的试验研究[J]. *西安矿业学院学报*, 1998, 02: 15-19.
PAN Guobin, LIN Daneng. Experimental study on factors affecting destruction degree caused by hydraulic blasting[J]. *Journal of Xi'an Mining Institute*, 1998, (2): 15-19.
- [5] 林德余, 马万昌, 李忠, 等. 岩石爆破中水垫层作用的研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1992, 11(2): 130-139.
LIN Deyu, MA Wanchang, LI Zhong, et al. Research on the effects of bottom water cushion on long hole blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1992, 11(2): 130-139.
- [6] 王林. 水中冲击波传播规律及在水压爆破中的应用[J]. *爆破*, 1994(4): 45-48.
WANG Lin. A spread regular of impact waves in the water and applies in hydraulic explosions[J]. *Blasting*, 1994(4): 45-48.
- [7] ADACHI J, SIEBRITS E, PEIRCE A, et al. Computer simulation of hydraulic fractures[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2007, 44(5): 739-757.
- [8] HUANG Bingxiang, LI Pengfeng. Experimental investigation on the basic law of the fracture spatial morphology for water pressure blasting in a drillhole under true triaxial Stress[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48(4): 1699-1709.
- [9] LI L C, TANG C A, LI G, et al. Numerical simulation of 3D hydraulic fracturing based on an improved flow stress damage model and a parallel FEM Technique[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2012, 45(5): 801-818.
- [10] 颜事龙, 徐颖. 水耦合装药爆破破岩机理的数值模拟研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2005, 1(6): 921-924.
YAN Shilong, XU Ying. Numerical simulation of water coupled charge rock blasting mechanism[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(6): 921-924.
- [11] 俞统昌, 王晓峰, 王建灵. 炸药的水下爆炸冲击波性能[J]. *含能材料*, 2003, 11(4): 182-186.
YU Tongchang, WANG Xiaofeng, WANG Jianling. Underwater shockwave performance of explosives[J]. *Energetic Materials*, 2003, 11(4): 182-186.
- [12] 陈士海, 王明洋, 赵跃堂, 等. 岩石爆破破坏界面上的应力时程研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(11): 1784-1788.
CHEN Shihai, WANG Mingyang, ZHAO Yuetang, et al. Time-stress history on interface between cracked and uncracked zones under rock blasting[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(11): 1784-1788.
- [13] 库尔. 水下爆炸[M]. 北京: 国防工业出版社, 1960.
COULL. Underwater explosion[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1960.
- [14] 程康, 徐学勇, 谢冰. 工程爆破理论基础[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2014.
CHENG Kang, XU Xueyong, XIE Bing. Foundation of engineering blasting theory[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2014.
- [15] 周昕清. 爆炸动力学及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
ZHOU Tingqing. Explosive dynamics and its applications[M]. Hefei: China science and technology university press, 2001.
- [16] 王兴发, 王中黔. 断裂原理在预裂爆破工程中的应用[J]. *铁道学报*, 1983(2): 70-77.
WANG Xingfa, WANG Zhongqian. The application of fracture principle in precrack blasting engineering[J]. *Journal of The China Railway Society*, 1983(2): 70-77.
- [17] 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(s1): 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(s1): 3144-3149.
- [18] 李翼祺, 马素贞. 爆炸力学[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
LI Yiqi, MA Suzhen. Explosion mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [19] 孙荣康, 魏运洋. 硝基化合物炸药化学与工艺学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
SUN Rongkang, WEI Yunyang. Nitro compound explosives chemistry and technology[M]. Beijing: Weapons industry press, 1992.

(编辑 吴海西)