

初始应力对应力波传播及块体运动规律影响研究

范新^{1,2}, 王明洋², 施存程¹

(1. 第二炮兵指挥学院, 湖北 武汉 430012; 2. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 借助理论模型和试验测试结果分析初始应力对岩石弹性波速的影响, 运用数值模拟手段对比研究爆炸扰动作用下不同初始应力时的应力波形状, 包括质点应力、位移和速度, 得到初始应力对应力波传播影响的一般规律。建立构造块体在爆炸扰动下的运动模型, 通过对模型的计算和分析, 研究不同初始应力下单个块体的相对位移。研究表明: (1) 在低初始应力下, 岩石中的弹性波速随压力增大而迅速增大, 增大的梯度在低应力下较高, 在高应力下趋于一常数; (2) 当初始应力增大时, 相同距离处的峰值径向应力和峰值位移会降低, 而且衰减较快, 波形变窄; (3) 块体间的相对位移与初始应力的值成反比。

关键词: 岩石力学; 初始应力; 应力波传播; 块体运动; 数值模拟

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2009)增2 - 3442 - 05

STUDY ON EFFECTS OF INITIAL STRESS ON STRESS WAVE PROPAGATION AND BLOCK MOVEMENT LAW

FAN Xin^{1,2}, WANG Mingyang², SHI Cuncheng¹

(1. The Second Artillery Command Academy, Wuhan, Hubei 430012, China; 2. Engineering Institute of Engineering Crops, PLA University of Science of Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract: The effect of initial stress on velocity of wave propagation in rock is analyzed by theoretic models and test results. The shapes of stress wave including particle stress, displacement and velocity with different initial stresses under the condition of explosion disturbances are studied by method of numerical simulation, and the basic law of initial stress effect on wave propagation is obtained. The movement model of structural block under the effect of explosion is built. The relative displacement of single block with different initial stresses is studied through increasing calculating and analyzing the numerical model. The results show that: (1) the velocity of wave propagation in rock increases rapidly under low initial stress, and tends to be constant under high initial stress; (2) the radial stress and displacement at the same distance will decrease with increasing of initial stress rapidly, and the wave shape will become narrow; and (3) the relative displacement of single block has inverse ratio to the value of initial stress.

Key words: rock mechanics; initial stress; stress wave propagation; block movement; numerical simulation

1 引言

岩体地应力是由岩体自重和构造引起的, 是进

行岩体工程问题数值计算的初始条件之一, 也是分析工程岩体破坏和位移特征的基本因素。在地球物理和探矿领域, 初始应力的影响得到了足够的重视并进行了大量的测试^[1]。A. Nur 等^[1]在不同围压下

收稿日期: 2008 - 06 - 04; **修回日期:** 2008 - 07 - 20

作者简介: 范新(1975 -), 男, 博士, 1998年毕业于解放军理工大学工程兵工程学院建筑工程系防护工程专业, 现任讲师, 主要从事防护工程方面的教学与研究工作。E-mail: fannxin@126.com

对饱和水岩石纵、横波速度进行了室内测试; D. H. Han 等^[2]对 80 块饱和水砂岩岩样进行了室内超声波测试, 其中分析了有效应力对岩石纵、横波速度的影响; 沈联蒂等^[3]在饱和油、饱和水、饱和气、束缚水、残余油等 5 种状态下, 分别测试了 8 种砂砾岩样品纵、横波速随有效应力的变化。关于初始应力对弹性波速影响的理论研究, 到目前为止, 已提出了多个有效应力对波速影响的数学模型, 但模型及模型参数的物理意义还有待深化, 有效应力对波速的影响还没有量化地引入地球物理解释和地层评价中。G. G. Kocharyan 等^[4, 5]较早关注了初始应力对块体运动规律的影响, 他们研究发现: 初始应力和爆炸扰动及块体间的构造特征共同影响着块体的运动, 并建立了包含初始应力的块体运动模型。M. V. Kurlenya 等^[6, 7]利用质量和线性及非线性弹簧体系简化了深部岩体的变形与运动计算模型, 模型中考虑了岩体自重的影响。

初始应力的存在使岩体内部的结构面力学效应消失, 导致结构破坏机制转化, 改善岩体力学性质。同时, 地应力的存在使深部岩体具有储能特征, 当爆炸扰动足够大时, 会伴随着能量的释放^[8, 9]。所以, 对于一般的浅埋爆炸, 在求解自由场应力建立方程时通常不考虑地应力的影响, 而爆炸埋深较大时, 考虑和不考虑由岩石自重而引起的初始应力会使计算结果产生一定的偏差, 这种影响在浅埋爆炸时意义不是很大, 而对于深部岩体中应力波传播和块体运动规律的研究具有很重要的意义。

2 对应力波传播规律的影响

关于初始应力对岩石弹性波速的影响, 目前已经有了众多的数学模型来进行描述^[1], 具体为

Towle 模型:

$$v^2 = v_0^2 + m\sigma_0^{0.333} \quad (1)$$

Khaksa 模型:

$$v = a + b\sigma_0 - ce^{-d\sigma_0} \quad (2)$$

Werfer 模型:

$$v = a(\sigma_0/100)^\alpha + b(1 - e^{-\beta\sigma_0}) \quad (3)$$

Eberhart-Phillios 模型:

$$v = a - b\phi - c\sqrt{v_d} + 0.446(\sigma_0 - e^{-16.3\sigma_0}) \quad (4)$$

式中: v 为岩石弹性波速; v_0 为初始弹性波速; σ_0 为初始应力; ϕ 为孔隙度; v_d 为黏土含量; $a, b, c,$

d, m 均为回归系数。

葛洪魁等^[1]把以上的模型归纳为如下的简单形式:

$$v = a' - b'e^{-c'\sigma_0} \quad (5)$$

当 $\sigma_0 \rightarrow \infty$ 时, $v = a'$, 代表高压下岩石的弹性波速; 当 $\sigma_0 = 0$ 时, $v = a' - b'$, 代表初始应力为 0 时的弹性波速。 b' 值代表有效应力引起的波速变化量, c' 值代表波速随有效应力增加的梯度。在围压和孔隙压力作用下, 对饱和和癸烷砂岩弹性波速随有效应力的变化的试验测定结果也同样说明了模型所描述的规律, 如图 1 所示。

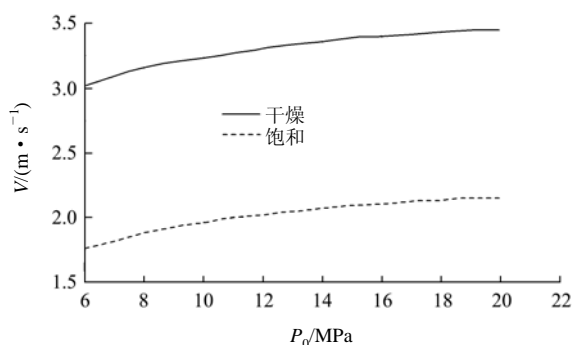


图 1 岩石弹性波速随有效应力的变化

Fig.1 Change of rock elastic wave velocity with effective stress

图 1 中的测试结果^[1, 10]表明: 对于不同饱和度的岩石, 低应力下波速随压力增大而增大迅速, 增大的梯度在低应力下较高, 在高应力下趋于一常数值。干燥岩石比饱和岩石对有效应力更加敏感, 变化量大。饱和水可大大增加岩石的纵波波速, 但对横波波速影响很小, 或由于岩石密度增加而使横波波速下降; 裂隙类岩石波速比孔隙类岩石随应力增大而增加迅速。有效应力对波速的影响主要由孔隙空间减少和颗粒接触刚度增大引起, 接触刚度增大的作用更大。岩石波速敏感性与孔隙流体类型、孔隙几何形态和岩石的构造位置有关^[11]。

为了进一步研究初始应力对应力波传播规律的影响, 本文运用数值模拟方法, 建立了如图 2 所示的二维计算模型^[12]。 $p(t)$ 为弹性空腔上施加的应力波荷载, 其波形函数为

$$p(t) = e^{-\alpha t} \sin(\omega t) \quad (6)$$

式中: α 为衰减系数, 与装药半径等参数有关, 计算中取 $\alpha = 10$; ω 为振动周期, 计算中取 $\omega = 50$ s。

当初始应力不同时, 应力波传播通过一定的距离(50 m)后, 其波形变化如图 3 所示。

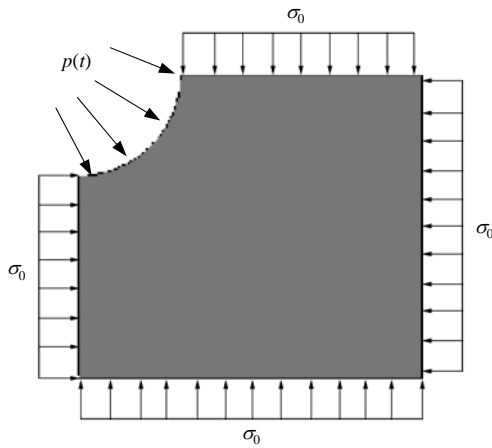
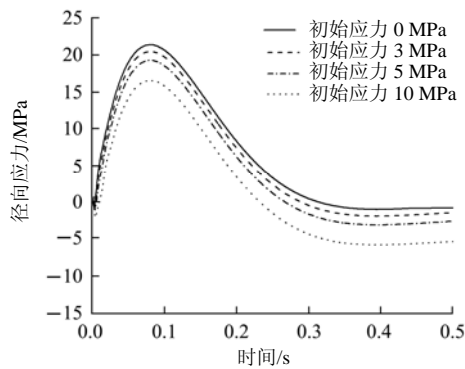
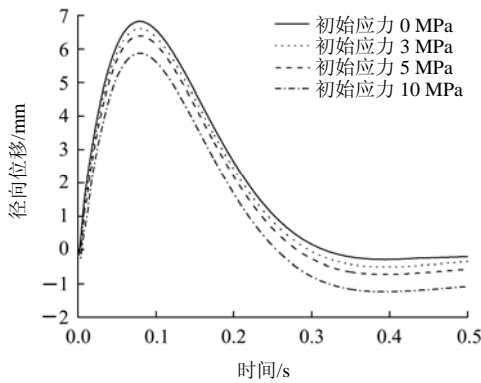


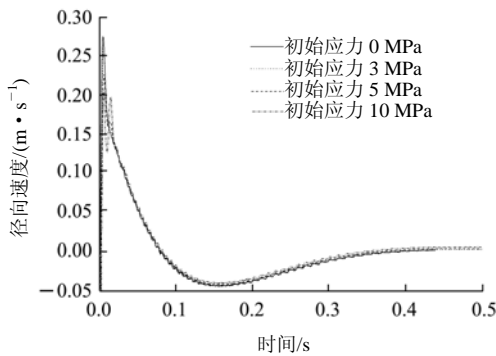
图2 数值计算模型
Fig.2 Numerical model



(a) 径向应力



(b) 径向位移



(c) 径向速度

图3 不同初始应力下质点波形变化曲线
Fig.3 Waveforms of particle with different initial stresses

图 3(a)为不同初始应力条件下质点径向应力随时间的变化曲线。由图中的计算结果可以看出，岩体中的初始应力对径向质点应力会产生一定影响，当初始应力增大时，相同距离处的径向应力峰值会降低，其原因是由于初始应力和爆炸应力波相互叠加的结果。

在径向位移图上(见图 3(b))，同样，随着初始应力增大，质点位移峰值降低，而且衰减较快，波形变窄，引起这种现象的原因可以归结为介质颗粒接触刚度增大的结果。

在质点径向速度图中(见图 3(c))，不同初始应力条件下，初始时刻的速度峰值发生一定的波动，随着计算时间的增加波形基本趋于相同，几乎看不出由于初始应力不同而引起的差异，初始应力对质点速度影响的不敏感性可能与地应力取值较小有关。

3 对块体运动规律的影响

构造块体在强爆炸扰动下产生运动和变形，从而破坏了块体界面间的原始平衡状态，形成残余应变。引起块体间界面运动和变形的主要有以下几种机制：单个岩块的无形变惯性运动，构造块体的变形，构造扰动前后波运动参数不同引起的裂隙或断层处的相对位移及伴随弹性能释放所引起的间断面构造破坏或滑移^[13, 14]。

G. G. Kocharyan 等^[4, 5]很早就对块体在爆炸荷载作用下的运动行为作了深入研究，其中之一就是假定块体运动可能发生在软弱夹层或沿自由表面方向，并采用如下的模型作为块体构造的一部分来进行计算^[4]：边长为 L_i 的立方体块体单元位于一个大的断层边界，它们形成构造等级为 L_2, L_3, \dots, L_i 的块体结构，每一个尺度为 L_i 的构造岩块都与断层面相接，如图 4 所示。

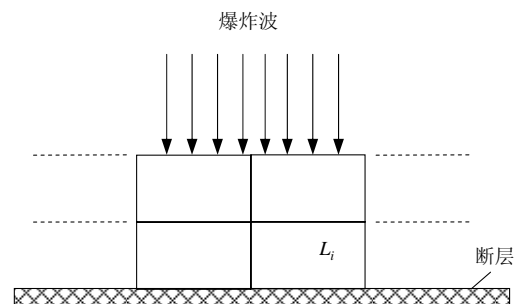


图4 块体单元构造模型

Fig.4 Model for the element of block structure

当波垂直传播到断层表面时, 其位移可用函数 $W(R, t)$ 表示。块体之间及块体与周围岩体之间的相互作用, 可以根据库仑定律表示为

$$F_{fi} = 4L_i^2(\sigma_n K + c_R) \quad (7)$$

式中: F_{fi} 为第 i 个岩块侧表面的摩擦力, σ_n 为相应的法向应力, K 为摩擦因数, c_R 为黏聚力。

为简化计算, 作如下假定: 不同大小的裂缝具有相同的 c_R 值; 边长为 L_i 的立方体岩块(包括较低构造层次的小尺度岩块)都可被认为是一个节理, 波在节理中传播时没有形状和幅值的改变, 波的运动参数在块体中不随时间改变, 并且是由从爆源到块体中心的距离决定, 块体为弹性介质。

波在岩体中传播, 当波速 $\dot{W}(R, t)$ 达到最大值时, 所有尺度的岩块将会一起运动。当波速 $\dot{W}(R, t)$ 开始衰减时, 块体受到侧表面上惯性力和摩擦力的影响, 岩块将开始分离。如果下列条件得到满足, 单个块体将与周围块体或整个岩体作相对运动:

$$\left| \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} \right| \geq \left| \frac{F_{fi}}{M_i} \right| = a_{fi} \quad (8)$$

式中: M_i 为第 i 个岩块的质量, t 为从波到达岩块边界开始算起的时间, a_{fi} 为 i 个岩块的加速度。

当满足式(8)时, 在 $t=t_*$ 时刻, 块体与整个岩体开始有相对运动, 而在此之前, 块体与整个岩体一起运动。在 $t > t_*$ 时刻, 块体 L_i 的绝对速度为

$$V_b(t) = V(t_*) - \int_{t_*}^t a_{fi}(\tau) d\tau \quad (9)$$

块体与整个岩体的相对速度为

$$V_{\text{brel}}(t) = V(t_*) - V(t) - \int_{t_*}^t a_{fi}(\tau) d\tau \quad (10a)$$

其中,

$$V(t) = \partial W / \partial t$$

$$a_{fi} = \begin{cases} 4[(\sigma_0 + \sigma_f)K + c_R] / \rho L_i & (\sigma_0 + \sigma_f < 0) \\ 4c_R / \rho L_i & (\sigma_0 + \sigma_f \geq 0) \end{cases} \quad (10b)$$

式中: σ_0 为初始应力; σ_f 为爆炸波作用下的质点应力值, $\sigma_f = \rho c W$, c 为纵波速度; 当 $\sigma_0 + \sigma_f < 0$ 时说明块体之间有接触摩擦作用, 当 $\sigma_0 + \sigma_f \geq 0$ 时说明块体之间的作用力为黏聚力。

岩块位移将继续增加, 直到满足条件 $V_b(t_{**}) = V(t_{**})$, 即 $V_{\text{brel}}(t_{**}) = 0$ 。如果式(8)得到满足, 岩块将再一次发生分离破坏。然而, 通常规律是, 对于强爆炸产生的应力波而言, 在 t_{**} 时刻的加速度已经不是特别大。这样, 块体的相对位移为

$$\Delta W = \int_{t_*}^{t_{**}} V_{\text{brel}}(\tau) d\tau = \int_{t_*}^{t_{**}} \left[V(t_*) - V(\tau) - \int_{t_*}^t a_{fi} d\tau \right] d\tau \quad (11)$$

下面根据输入的爆炸地震波波及相关参数, 根据式(7)~(11), 研究块体运动参数与初始应力、波形参数及节理物理特征之间的关系。

爆炸地震波的波动荷载(位移)按照唐廷^[7]的思路可以采用如下形式:

$$W(R, t) = A(R) e^{-\alpha t} \sin(\omega t) \quad (12)$$

式中: $A(R)$ 为位移幅值, 根据地下核试验自由场位移衰减规律, $A(R)$ 的表达形式取为 $A(R) = 0.095 5 (Q/R^2)^{1.1}$ 。

计算所采用的参数^[5, 10]为: $\rho = 2 600 \text{ kg/m}^3$, $c = 4 500 \text{ m/s}$, $K = 0.2$, $\alpha = 10$, $\omega = 50 \text{ s}$, $c_R = 0.1 \sim 1.0 \text{ MPa}$, $\sigma_0 = 1 \sim 5 \text{ MPa}$, 爆炸当量 $Q = 1 \text{ kt}$ 。

图 5 为不同初始应力下块体的相对位移随比距离的变化关系。其中黏聚力 $c_R = 1 \text{ MPa}$, 初始应力 σ_0 分别为 1, 5 和 10 MPa。

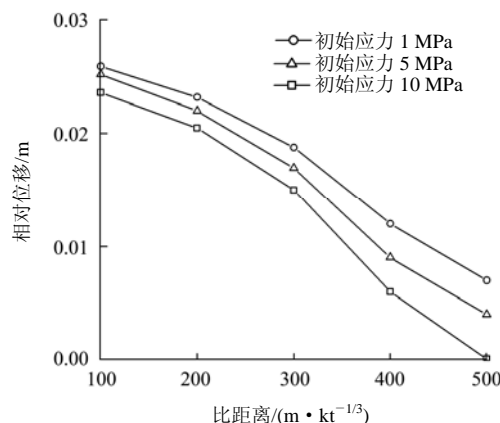


图 5 不同初始应力下块体的相对位移随比距离的变化关系
Fig.5 Change of relative displacement of block with scaled distance under different initial stresses

由图 5 的计算结果可以看出, 初始应力对块体的相对运动具有较为明显的规律, 在不同的初始应力下, 块体的相对位移随比距离的关系曲线保持基本相同的形状, 概括为: 块体间的相对位移与初始应力的大小成反比, 在离爆炸较近的区域, 块体运动参数与地应力的大小有较小的依赖关系, 随着比距离的增加, 地应力的影响变得明显。

4 结 论

本文通过对不同初始应力条件下应力波传播和块体变形运动规律的研究, 初步得到以下基本结

论:

(1) 在低应力下, 岩石中的弹性波速随压力增大而增加迅速, 增大的梯度在低应力下较高, 在高应力下趋于—常数值。有效应力对波速的影响主要由孔隙空间减少和颗粒接触刚度增大引起。

(2) 当初始应力增大时, 相同距离处的径向应力峰值和位移峰值会降低, 而且衰减较快, 波形变窄。速度峰值会在初始时刻发生一定的波动, 随着计算时间的增加波形基本趋于相同。

(3) 块体间的相对位移与初始应力的成反比, 在离爆炸较近的区域, 块体运动参数与地应力的成反比, 随着比距离的增加, 地应力的影响变得明显。

参考文献(References):

- [1] 葛洪魁, 陈 颢, 韩德华. 有效应力对岩石弹性波速的影响[J]. 地球物理学报, 2001, 44(增 1): 152 - 154.(GE Hongkui, CHEN Yong, HAN Dehua. The effect of effective stress on rock elastic wave velocities[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2001, 44(Supp.1): 152 - 154.(in Chinese))
- [2] HAN D H, NUR A, MORGAN D. Effect of porosity and clay content on wave velocities in sandstones[J]. Geophysics, 1986, 51: 2 093 - 2 107.
- [3] 沈联蒂, 史 譔. 岩性、含油气性、有效覆盖压力对纵、横波速的影响[J]. 地球物理学报, 1994, 37(3): 391 - 399.(SHEN Liandi, SHI Ge. Effect of lithologic character, petroleum and effective overburden pressure on compressional wave and shear wave velocity[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(3): 391 - 399.(in Chinese))
- [4] KOCHARYAN G G, SPIVAK A A. Movement of rock blocks during large-scale underground explosions. part I: experimental data[J]. Journal of Mining Science, 2001, 37(1): 64 - 75.
- [5] KOCHARYAN G G, SPIVAK A A, BUDKOV A M. Movement of rock blocks during large-scale underground explosions. part II: estimates by analytical models, numerical calculations, and comparative analysis of theoretical and experimental data[J]. Journal of Mining Science, 2001, 37(2): 149 - 167.
- [6] KURLENYA M V, OPARIN V N, BALMASHNOVA E G., et al. On dynamic behavior of self-stressed block media. part I: one-dimensional mechanico-mathematical model[J]. Journal of Mining Science, 2001, 37(1): 1 - 9.
- [7] OPARIN V N, BALMASHNOVA E G, VOSTRIKOV V I. On dynamic behavior of self-stressed block media. part II: comparison of theoretical and experimental data[J]. Journal of Mining Science, 2001, 37(5): 455 - 461.
- [8] 李夕兵, 李地元, 郭 雷. 动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 922 - 928.(LI Xibing, LI Di Yuan, GUO Lei. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 922 - 928.(in Chinese))
- [9] 戚承志, 钱七虎, 王明洋. 岩体的构造层次黏性及动力强度[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 1): 4 679 - 4 687.(QI Chengzhi, QIAN Qihu, WANG Mingyang. The structural hierarchy viscosity and dynamic strength of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.1): 4 679 - 4 687.(in Chinese))
- [10] 金 衍, 陈 勉, 郭凯俊. 复杂泥页岩地层地应力的确定方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2 287 - 2 291.(JIN Yan, CHEN Mian, GUO Kaijun. Study on determination method of in-situ stress for complex silt formations[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2 287 - 2 291.(in Chinese))
- [11] 王宏图, 鲜学福. 复杂应力状态下岩石弹性波传播特性的研究[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 1988, (5): 52 - 59.(WANG Hongtu, XIAN Xuefu. The study on characteristics of elastic wave propagation in rocks under complicated stress states[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science), 1988, (5): 52 - 59.(in Chinese))
- [12] CHERRY J T, PETERSEN F L. Numerical simulation of stress-wave propagation from underground nuclear explosions[C]// Peaceful Nuclear Explosions. Vienna: IAEA, 1970: 142 - 220.
- [13] 王明洋, 戚承志, 钱七虎. 深部岩体块系介质变形与运动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2 825 - 2 830.(WANG Mingyang, QI Chengzhi, QIAN Qihu. Study on deformation and motion characteristics of blocks in deep rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2 825 - 2 830.(in Chinese))
- [14] 范 新, 王明洋, 谭可可. 爆炸荷载作用下深部块体变形运动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1 019 - 1 025.(FAN Xin, WANG Mingyang, TAN Keke. Study on rule of block deformation and movement under explosion loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1 019 - 1 025.(in Chinese))