

岩体单孔及群孔齐发爆破爆炸荷载数值分析

夏 祥¹, 石永强², 李海波¹, 马行东³, 刘 博¹

(1. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071;

2. 中广核工程有限公司, 广东 深圳 518031; 3. 成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 采用广东岭澳核电站现场岩体的力学特性和基岩爆破参数, 利用高能炸药的状态方程模拟岩石乳化炸药的爆炸过程, 并假定岩石在爆炸产生的高应变率和高压环境下符合率相关的弹塑性本构关系, 由此利用显式动力分析方法模拟单孔柱状装药和群孔齐发爆破柱状装药情况下的岩体爆炸应力波的传播过程, 分析岩体爆炸粉碎区边界峰值应力的变化情况和衰减特征, 并与相关理论公式进行比较, 得到单孔和群孔齐发爆破情况下岩体爆炸荷载随装药量的变化规律。研究表明, 爆源近区岩体爆炸冲击波压力急剧衰减; 岩体爆炸峰值应力随装药量增加而增加; 拉应力随药量的增长幅度远比压应力小; 单孔药量的变化对岩体爆炸荷载的影响大于最大段药量的影响。工程实践中采用多爆孔小药量的爆破方式能有效减小岩体动态响应。

关键词: 数值分析; 爆炸荷载; 岩体; 装药量

中图分类号: O 241

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2007)增 1 - 3390 - 07

NUMERICAL ANALYSIS OF EXPLOSIVE LOAD OF SINGLE-HOLE BLASTING AND MULTIPLE-HOLE SIMULTANEOUS BLASTING IN ROCKMASS

XIA Xiang¹, SHI Yongqiang², LI Haibo¹, MA Xingdong³, LIU Bo¹

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China;

2. China Nuclear Power Engineering Company Ltd., Shenzhen, Guangdong 518031, China;

3. Chengdu Hydroelectric Investigation and Design Institute, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: Explosive load of individual blasting and multiple-hole simultaneous blasting in rockmass with column charging has been analyzed based on information of construction site at Lingdong Nuclear Power Station(LNPS), Guangdong Province, China. The blasting progress is simulated via JWL equation of state for high explosives. And the rockmass in environment with high pressure and high strain rate induced by blasting is considered as an isotropic and kinematic hardening plasticity material including rate effects. Propagation characteristics of blast-induced stress waves have been achieved using explicit dynamic analysis code LS-DYNA. The attenuation characteristics of maximum pressure of targets in rock have been analyzed. It is reported that the numerical simulation results agree well with those from theoretical calculation. Based on maximum pressure of rock in crushed zone induced by blasting with different charging weights, the variation characteristics of blasting load with charging weight with individual blasting and multiple-hole simultaneous blasting are studied. It is noted that in region around charging holes, the maximum pressure decreases rapidly with distance from charge center. Peak

收稿日期: 2007 - 04 - 28; **修回日期:** 2007 - 05 - 31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50374063, 50439030); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2002CB412705)

作者简介: 夏 祥(1976 -), 男, 博士, 1999年毕业于武汉水利电力大学土木工程学院工业与民用建筑专业, 主要从事岩石动力学方面的研究工作。
E-mail: Mr_xiaxiang@sohu.com

compressive stress and peak tensile stress both increase with charging weight. It is also suggested that the blasting load is more sensitive to single charge weight than maximum charging weight per delay in multiple-hole blasting. For this case, it is helpful to reduce the blasting vibration when blasting with more charge holes and less charge weight.

Key words: numerical analysis; blasting load; rock mass; charge weight

1 引 言

爆炸荷载的确定是分析岩体爆炸破裂过程和损伤特征, 控制爆破地震效应的基础和前提。爆炸荷载实际上是炸药爆炸后作用在周围岩体的冲击波^[1]。其波形分布和幅值等受很多因素的影响, 比如炸药种类、装药方式、爆孔数目以及岩体特性等, 爆炸荷载很难准确量化, 相关的实验数据和理论研究成果目前比较少见。在一些爆炸动力分析中, 爆炸动荷载通常是将等效静荷载乘以动力系数(通常为 1~2)得到^[2]。另一种方法是假定爆炸荷载为三角形脉冲波^[3~6], 荷载峰值根据 J. Henrych^[7]提出的药包中心处爆轰波产生的初始压力估算。

目前国内外科研人员主要从数值模拟和理论分析的角度对岩体的爆炸荷载进行研究。如 S. G. Chen 等^[1]利用数值分析的方法分析了地下球状装药情况下的岩体爆炸荷载, 以此为基础对爆炸荷载作用下的节理岩体振动特征进行了分析。李 宁和 G. Swoboda^[8]通过爆生气体的状态方程以及爆生气体与周围岩体的相互作用分析, 得到了单孔爆破情况下完整岩石和包含初始裂隙岩体的爆炸荷载。浦锡锋等^[9]分析了花岗岩中强爆炸自由场应力波参数和空腔解耦强爆炸对岩壁的压力, 得到了炸药爆炸后岩体中峰值径向应力随比例距离的变化趋势。王铁良等^[10]采用一维球对称流体弹塑性模型模拟了一系列 TNT 填实爆炸引起的周围岩石动力学参量的变化, 得到了围岩中峰值应力、粒子速度、加速度及位移的近似公式, 并与实测结果进行了比较。此外, 陈士海等^[11]、周传波等^[12]也利用数值分析方法对岩石中的爆炸冲击波以及爆破破坏机制进行了研究。

爆炸荷载的理论分析方面, 已有的研究成果主要是根据爆炸动力学理论和爆炸冲击波对岩体的破碎机制, 提出炸药爆炸产生的最大冲击压力计算公式^[13]。徐 颖等^[14]从炸药爆炸的能量分布和爆破破坏岩特征的分析出发, 研究了耦合装药和不耦合装药情况下的爆孔孔壁岩石上的冲击压力。戴 俊^[15]和

杨永琦^[16]均对此进行了类似研究。

此外部分学者通过炸药爆炸实验对爆炸荷载进行了探讨。N. Jacob 等^[17]认为, 爆炸冲击压力随炸药长度和半径的增大线性递增, 随炸药长径比(炸药高度与直径的比)增大而减小。T. Korichi 和 B. Bachir^[18]利用砂岩进行了一系列水下爆破实验, 对影响爆炸冲击波幅值的各种因素进行了分析, 认为当装药密度和不耦合系数一定的情况下, 爆炸冲击压力随药柱长度的减小而减小; 冲击压力与装药量成线性关系, 采用不耦合炸药方式能显著减小爆炸冲击波峰值应力。

本文以广东岭澳核电站二期基岩爆破施工为基础, 根据现场岩体力学特性和装药参数, 利用高能炸药的状态方程模拟岩石乳化炸药的爆炸过程, 并假定岩石在爆炸产生的高应变率 and 高压环境下符合率相关的弹塑性本构关系, 利用有限元程序 LS-DYNA 对岩体爆炸荷载与装药量的关系进行模拟分析, 得到了在单孔及群空齐发爆破情况下岩体爆炸荷载的变化规律。

2 数值计算模型

2.1 炸药状态方程

LS-DYNA 程序可以直接模拟高能炸药的爆炸过程。炸药点火后体积膨胀, 产生压力传递给周围介质。任意时刻爆源内一点的压力^[18]可表示为

$$p = Fp_{\text{eos}}(V, E) \quad (1)$$

$$F = \begin{cases} \frac{2(t-t_1)DA_{\text{emax}}}{3v_e} & (t > t_1) \\ 0 & (t \leq t_1) \end{cases} \quad (2)$$

$$p_{\text{eos}} = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

式中: p 为爆炸压力(Pa); F 为炸药的化学能释放率; D 为炸药爆速(m/s); t , t_1 分别为当前时间和炸药内

一点的起爆时间(s); A_{emax} 为炸药单元横截面积最大值; v_e 为炸药单元体积; p_{eos} 为由 JWL 状态方程决定的压力(Pa); E 为单位体积比内能(Pa); A, B, R_1, R_2, ω 均为与炸药相关的材料常数; V 为相对体积; E_0 为初始比内能(Pa)。

岭澳核电站现场爆破实验使用的炸药为 2# 岩石乳化炸药, 装药参数和 JWL 状态方程参数列于表 1。

表 1 炸药和状态方程参数

Table 1 Properties of explosive and JWL equations

密度 ρ_0 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速 D /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E_0 /GPa
1 300	4 000	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

2.2 岩体计算模型

炸药爆炸时近区岩体应变很大, 应变率效应明显, 采用包含应变率效应的塑性硬化模型:

$$\sigma_Y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{P}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_p^{\text{eff}}) \quad (4)$$

$$E_p = \frac{E_Y E_{\text{tan}}}{E_Y - E_{\text{tan}}} \quad (5)$$

式中: σ_0 为岩体的初始屈服应力(Pa); E_Y 为杨氏模量(Pa); $\dot{\varepsilon}$ 为加载应变率(s^{-1}); C, P 为 Cowper-Symonds 应变率参数, 为由材料应变率特性决定的常量, 参考 R. Yang 等^[19]所做的岩体在不同应变率下的应力时程曲线和应力-应变关系成果, 分别取 2.5 s^{-1} 和 4.0 ; E_p 为岩体塑性硬化模量(Pa); E_{tan} 为切线模量(Pa); β 为各向同性硬化和随动硬化贡献的硬化参数, $0 \leq \beta \leq 1$; $\varepsilon_p^{\text{eff}}$ 为岩体有效塑性应变, 按下式定义:

$$\varepsilon_p^{\text{eff}} = \int_0^t d\varepsilon_p^{\text{eff}} \quad (6)$$

$$d\varepsilon_p^{\text{eff}} = \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon_{ij}^p d\varepsilon_{ij}^p \quad (7)$$

式中: t 为发生塑性应变累计时间(s), ε_{ij}^p 为岩体塑性应变偏量分量。

岩石的动态抗压强度随加载应变率的提高而增大, 一般地, 可近似用下式^[20]表达岩石动态抗压强度与静态抗压强度之间的关系:

$$\sigma_{\text{cd}} = \sigma_c \dot{\varepsilon}^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

式中: σ_c 为岩石的单轴静态抗压强度(Pa)。工程爆破中, 岩石的加载应变率 $\dot{\varepsilon}$ 一般为 $10^0 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ ^[21]; 爆源附近应变率较高, 可取 $\dot{\varepsilon} = 10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$; 本文

取 10^4 s^{-1} 。对于岩体的动态抗拉强度, 由于缺乏相应的实验和理论分析数据, 也可近似取:

$$\sigma_{\text{td}} = \sigma_{\text{st}} \dot{\varepsilon}^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

式中: σ_{st} 为岩石的单轴静态抗拉强度(Pa)。

根据以上分析, 采用岭澳核电站二期工程基岩的静态基本力学参数转换为相应的动态力学参数。爆区岩体为角岩, 基本物理力学参数如表 2 所示。

表 2 核电站现场角岩基本物理力学特性参数

Table 2 Basic physico-mechanical parameters of hornstone in construction site of LNPS

密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	E_Y /GPa	泊松比	σ_0 /MPa	E_{tan} /GPa	σ_c /MPa	σ_{st} /MPa	C/s^{-1}	P
2 700	68.69	0.228	75	40	150	2.2	2.5	4.0

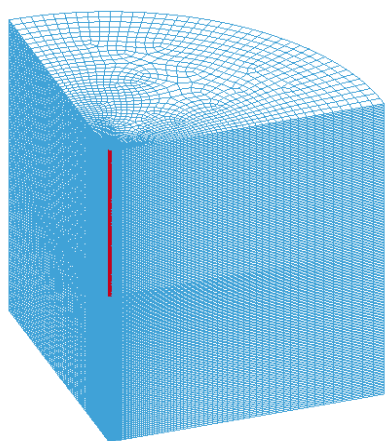
2.3 数值计算几何模型

数值计算时考虑了单孔及群孔齐发爆破 2 种情况, 其中群孔齐发爆破包括 3 孔、4 孔和 6 孔等各种情况。计算单孔爆破时改变装药量, 研究爆炸压力随单孔装药量的变化。对于群孔齐发爆破的情况, 影响岩体爆炸荷载的因素很多, 比如单孔药量、爆孔排列方式、爆孔间距、起爆延时等, 以最大段药量的影响最显著。计算时仅考虑齐发爆破的情况, 并假定各爆孔排列均匀, 爆孔半径、高度及装药量均相同。图 1(a), (b)分别为单孔和 6 孔爆破情况下的数值计算模型。模型中圆柱半径为 8 m, 高度为 8 m, 装药半径为 20~38 mm, 半径和长度根据最大段药量和爆孔数目计算时进行调整。模型两竖直边界以及底边边界约束垂直向位移, 顶面根据实际情况为自然边界, 外边界(圆弧面)条件为透射边界以减小边界应力波反射的影响, 反映爆源周围岩体的实际受力状态。

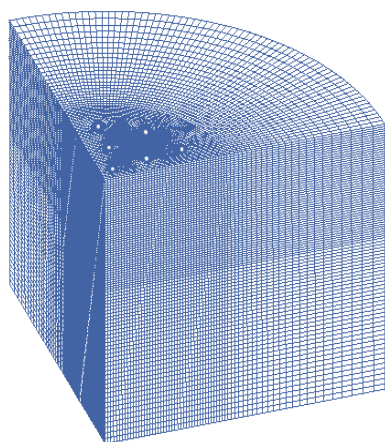
3 岩体爆炸荷载计算结果及分析

3.1 单孔及群孔齐发爆破的爆炸荷载

炸药爆炸后在爆孔围岩中形成粉碎区^[22], 范围较小, 为炸药半径的 2~7 倍^[23, 24]。这里仅探讨粉碎区边界岩体质点的爆炸应力。图 2 为单孔爆破时炸药爆炸后的粉碎区形状和爆炸某一时刻的应力波分布。根据计算结果可以测得粉碎区的半径约为 0.11 m, 而装药半径为 38 mm, 爆炸粉碎区半径与装药半径的比 $d = 2.8$, 与高尔新等^[23-25]的结果是一致的。



(a) 单孔



(b) 6 孔

图 1 岩体爆炸荷载数值计算模型

Fig.1 Computational models for rockmass blasting

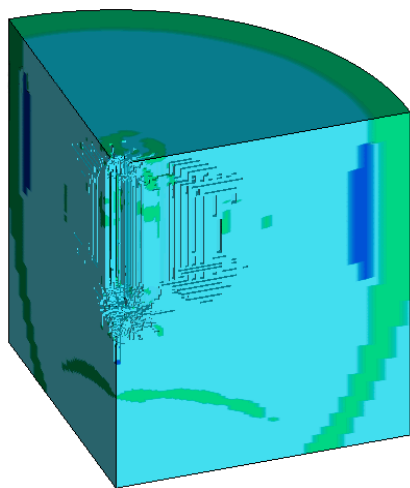


图 2 炸药起爆后爆孔周围岩体应力波分布

Fig.2 Distribution of stress waves in surrounding rock of charging holes after blasting

根据相关研究成果^[13~15, 26, 27], 单孔爆破情况下冲击波作用在粉碎区边界上岩体的峰值应力可由

下式计算:

$$P_r = \frac{P_d}{d^3} \tag{10}$$

$$P_d = \frac{\rho_0 D^2}{1 + \gamma} \frac{2 \rho C_p}{\rho C_p + \rho_0 D} \tag{11}$$

式中: P_r , P_d 分别为冲击波作用在粉碎区边界和孔壁岩石上的峰值应力(Pa); ρ , ρ_0 分别为岩体和炸药的密度(kg/m^3); C_p 为岩体纵波波速, 这里取 3 400 m/s; γ 为爆轰产物的膨胀绝热指数, 一般取 3; d 为质点到爆源中心的距离(爆心距)与装药半径的比, 这里取粉碎区半径与装药半径的比例。

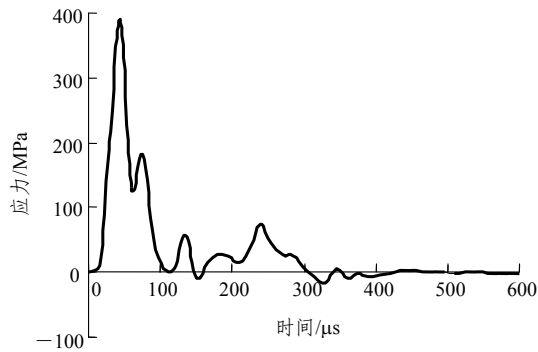
由式(10), (11)可得粉碎区边界岩体的峰值应力 $P_r = 380 \text{ MPa}$ 。图 3(a)为装药量 7.7 kg 时的单孔爆破情况下粉碎区边界岩体应力时程曲线。从图 3(a)中可以看出, 峰值应力为 394 MPa, 与理论计算的峰值应力 $P_r = 380 \text{ MPa}$ 比较接近, 并且由图中曲线可以看出炸药爆炸后冲击波持续时间很短, 为 80~100 μs , 与 F. V. Donze 等^[22]的结果相接近。这个过程中爆炸冲击波的压力荷载远远超过岩体的抗压强度, 岩体产生强烈的压缩破坏, 形成粉碎区。图 3(b)为装药量 30.9 kg 的 4 孔爆破情况下岩体应力时程曲线, 应力峰值为 520 MPa。同样地, 统计岩体中一系列质点的峰值应力, 即可得到爆源近区岩体爆炸应力的衰减规律。图 4 为数值模拟得到的单孔爆破情况下岩体爆后峰值应力衰减曲线并与按式(10), (11)计算结果进行比较。可见, 在装药半径约 15 倍的范围内岩体爆炸冲击波压力急剧减小, 幅度超过总衰减幅度的 90%。

3.2 单孔装药量的影响分析

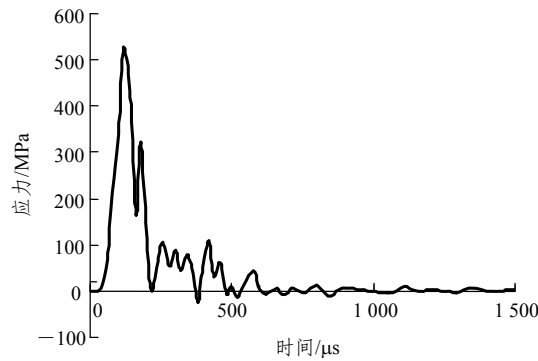
在单孔爆破的数值模型中, 通过改变单孔装药量, 得到了一系列装药量情况下的岩体粉碎区边界上的应力波曲线, 以及相应的峰值压应力和拉应力(见图 5)。岩体峰值拉应力和压应力均随单孔药量线性递增, 当单孔药量增加 2 倍时, 峰值拉应力增大大约 10%, 而峰值压应力增大了 1 倍, 可见炸药爆炸产生的最大拉应力随药量的增长幅度远比最大压应力小。

3.3 群孔齐发爆破最大段药量的影响分析

根据 2 孔、3 孔、4 孔等群孔齐发爆破情况下的数值计算结果, 得到了群孔齐发爆破情况下最大段药量的变化对岩体动态响应的影响(见图 6)。从图 6



(a) 单孔



(b) 4孔

图3 粉碎区边界岩体应力时程曲线

Fig.3 Time-history curve of pressure at the boundary of crushed zone

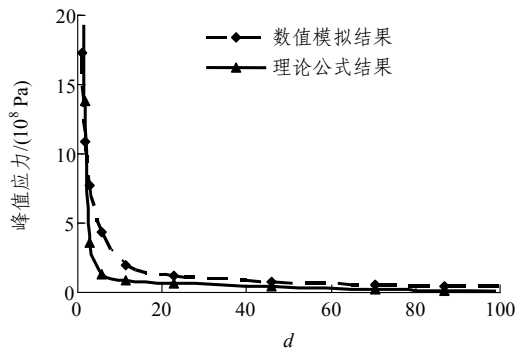
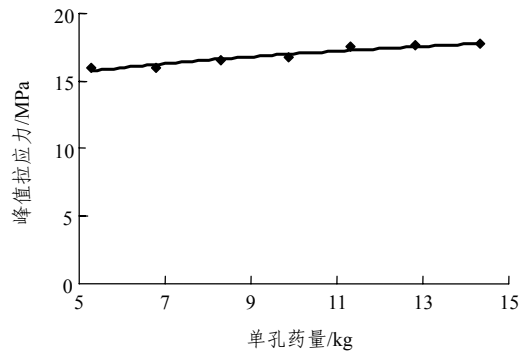


图4 岩体爆炸峰值应力衰减曲线

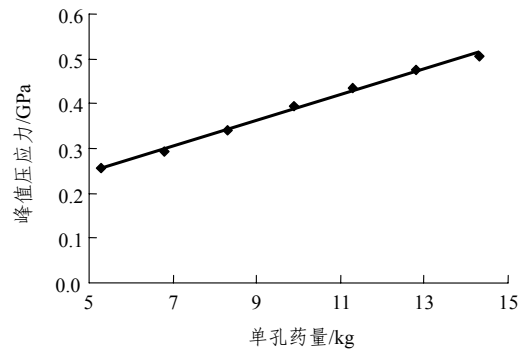
Fig.4 Curves of maximum pressure attenuation with distance

中可以看出,随着最大段药量的增大,岩体质点峰值拉应力变化幅度很小,几乎为定值。而峰值压应力变化幅度则较大。最大段药量增加6倍时,岩体质点峰值拉应力增大不到6%,而峰值压应力增大大约80%。

对比单孔与群孔齐发爆破的结果可知,当岩体爆炸压应力增大相同的幅度,比如80%时,单孔药量只增大了约1.3倍,而最大段药量则增大6倍,单孔药量的变化对岩体爆炸荷载的影响大于最大段药量,说明采用多爆孔小药量的爆破方式能有效



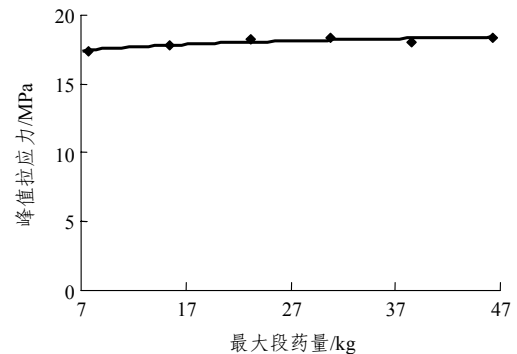
(a)



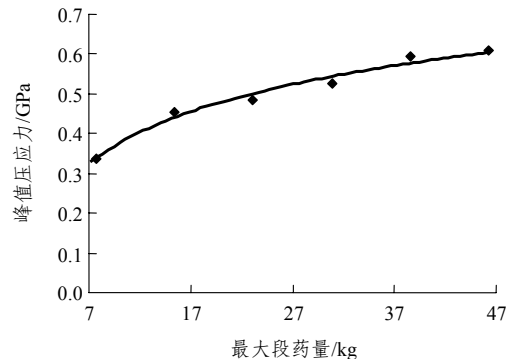
(b)

图5 岩体爆炸峰值应力随单孔装药量的变化

Fig.5 Maximum pressure of rock target vs. single charge weight



(a)



(b)

图6 岩体质点峰值应力随最大段药量的变化

Fig.6 Maximum pressure of rock target vs. charge weight per delay interval

减小岩体动态响应, 这一结论与工程实践是符合的。

4 结 论

本文根据广东岭澳核电站基础爆破开挖的实际情况, 认为岩体在炸药爆炸产生的高压高应变率环境下符合率相关的弹塑性本构关系, 并采用高能炸药爆炸的 JWL 状态方程, 利用显式动力分析方法模拟了单孔柱状装药和群孔齐发爆破情况下的岩体爆炸应力波的传播过程, 在此基础上分析了粉碎区边界岩体质点峰值应力的变化情况和衰减特征, 并与相关理论公式进行了比较, 由此得到了单孔及群孔齐发爆破情况下应力波的传播规律和岩体爆炸荷载随装药量的变化特征。结果表明:

(1) 在装药半径约 15 倍的范围内岩体爆炸冲击波压力急剧衰减, 减小幅度超过总衰减幅度的 90%。

(2) 岩体爆炸时炸药爆炸产生的冲击波作用时间为 80~100 μs , 在此期间爆孔周围岩体形成粉碎区。

(3) 岩体峰值拉应力和压应力均随单孔药量线性递增。炸药爆炸产生的最大拉应力随药量的增长幅度远比最大压应力小。

(4) 群孔齐发爆破情况下, 随着最大段药量的增大, 炸药爆炸产生的岩体质点峰值拉应力变化幅度很小, 几乎为定值, 而峰值压应力变化幅度则较大。

(5) 单孔药量的变化对岩体爆炸荷载的影响大于最大段药量的影响。工程实践中采用多爆孔小药量的爆破方式能有效减小岩体动态响应。

参考文献(References):

[1] CHEN S G, ZHAO J, ZHOU Y X. UDEC modeling of a field explosion test[J]. International Journal of Blasting and Fragmentation, 2000, (4): 149 - 163.

[2] ROSENGREN L. Preliminary analysis of the dynamic interaction between Norra Lanken and a subway tunnel for Stockholm, Sweden[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1993, 8(3): 429 - 439.

[3] 夏 祥, 李俊如, 李海波, 等. 爆破荷载作用下岩体振动特征的数

值模拟[J]. 岩土力学, 2005, 26(1): 50 - 56.(XIA Xiang, LI Junru, LI Haibo, et al. UDEC modeling of vibration characteristics of jointed rockmass under explosion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(1): 50 - 56.(in Chinese))

- [4] SENSENY P E, SIMONS D A. Comparison of calculational approaches for structural deformation in jointed rock[J]. International Journal of Numerical Analysis Methods in Geomechanics, 1994, 18(2): 327 - 344.
- [5] Itasca Consulting Group Inc.. Universal distinct element code, version 3.1 user's manual[R]. Minneapolis, Minnesota, USA: Itasca Consulting Group Inc.. 1999.
- [6] LOW H Y, HAO H. Reliability analysis of direct shear and flexural failure modes of RC slabs under explosive loading[J]. Engineering Structures, 2002, 24(2): 189 - 198.
- [7] HENRYCH J. Dynamics of explosion and its use[M]. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [8] 李 宁, SWOBODA G. 爆炸荷载的数值模拟与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1994, 13(4): 357 - 364.(LI Ning, SWOBODA G. A numerical model for blast load and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1994, 13(4): 357 - 364.(in Chinese))
- [9] 浦锡锋, 张海波, 田 宙, 等. 岩石中强爆炸动力学过程数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增 1): 5 007 - 5 012.(PU Xifeng, ZHANG Haibo, TIAN Zhou, et al. Numerical simulation of underground explosion in granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(Supp.1): 5 007 - 5 012.(in Chinese))
- [10] 王铁良, 张建鑫, 韩学安. 岩石中爆炸波传播的数值模拟[J]. 计算物理, 2000, 17(2): 126 - 130.(WANG Tieliang, ZHANG Jianxin, HAN Xuean. Numerical simulation of the stress produced by chemical explosion in rock[J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2000, 17(2): 126 - 130.(in Chinese))
- [11] 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): 1 784 - 1 788.(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): 1 784 - 1 788.(in Chinese))
- [12] 周传波, 谷任国, 罗学东. 坚硬岩石一次爆破成井掏槽方式的数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2 298 - 2 303.(ZHOU Chuanbo, GU Renguo, LUO Xuedong. Numerical simulation on cutting mode of shaft excavation by one-step deep-hole blasting in hard rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,

- 2005, 24(13): 2 298 - 2 303.(in Chinese))
- [13] 高金石, 张继春. 爆破破岩机制动力分析[J]. 金属矿山, 1989, (9): 6 - 12.(GAO Jinshi, ZHANG Jichun. Dynamic analysis to fracturing mechanism of rock under explosion[J]. Metal Mine, 1989, (9): 6 - 12.(in Chinese))
- [14] 徐颖, 丁光亚, 宗琦, 等. 爆炸应力波的破岩特征及其能量分布研究[J]. 金属矿山, 2002, (2): 13 - 16.(XU Ying, DING Guangya, ZONG Qi, et al. Study on the characteristics of rock fragmentation and energy distribution by blast stress wave[J]. Metal Mine, 2002, (2): 13 - 16.(in Chinese))
- [15] 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(20): 144 - 147.(DAI Jun. 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(20): 144 - 147.(in Chinese))
- [16] 杨永琦. 矿山爆破技术与安全[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991: 185 - 264.(YANG Yongqi. Techniques and safety of mine blasting[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1991: 185 - 264.(in Chinese))
- [17] JACOB N, CHUNG KIM YUEN S, NURICK G N, et al. Scaling aspects of quadrangular plates subjected to localised blast loads-experiments and predictions[J]. International Journal of Impact Engineering, 2004, 30(8/9): 1 179 - 1 208.
- [18] KORICHI T, BACHIR B. Design of a model blasting system to measure peak P-wave stress[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(4): 513 - 519.
- [19] YANG R, BAWDEN W F, KATSABANIS P D. A New constitutive model for blast damage[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1996, 33(3): 245 - 254.
- [20] 李夕兵. 岩石冲击动力学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 1994: 151 - 155.(LI Xibing. Shock dynamics of rock[M]. Changsha: Central South University Press, 1994: 151 - 155.(in Chinese))
- [21] 单仁亮. 岩石冲击破坏力学模型及其随机性研究[R]. 北京: 中国矿业大学, 1997.(SHAN Renliang. Mechanical model for shock failure of rock and its randomness analysis[R]. Beijing: China University of Mining and Technology, 1997.(in Chinese))
- [22] DONZE F V, BOUCHEZ J, MAGNIER S A. Modeling fractures in rock blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 1997, 34(8): 1 152 - 1 163.
- [23] 高尔新, 杨仁树. 爆破工程[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 1999.(GAO Erxin, YANG Renshu. Blasting engineering[M]. Beijing: China University of Mining and Technology Press, 1999.(in Chinese))
- [24] 钮强. 岩石爆破机制[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1990.(NIU Qiang. Mechanism of rock blasting[M]. Shenyang: Northeast University of Technology Press, 1990.(in Chinese))
- [25] HAGAN T N. Rock breakage by explosives[J]. Acta Astron., 1979, (6): 329 - 340.
- [26] 宗琦, 张魁. 不同装药条件下炮孔孔壁初始冲击压力[J]. 徐州建筑职业技术学院学报, 2002, 2(4): 6 - 8, 22.(ZONG Qi, ZHANG Kui. Initial shock pressures of different charging constitutions on the borehole wall[J]. Journal of Xuzhou Institute of Architectural Technology, 2002, 2(4): 6 - 8, 22.(in Chinese))
- [27] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984: 240 - 246, 318.(WANG Wenlong. Rock drilling blasting[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1984: 240 - 246, 318.(in Chinese))