

岩体中爆腔内压力脉动特征和爆炸能量分布的数值模拟

田振农¹, 张乐文¹, 李世海²

(1. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250016; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 分析了对岩体中爆炸能量分布和爆腔内压力研究的现状, 为进行这方面的研究, 在块体离散元基础上独立开发了可变形多尺度计算模型和爆源模型, 改进后的数值模型适合研究爆源近区的爆炸效应。通过该模型对岩体中爆腔内压力和爆炸能量分布进行了数值模拟, 分析了爆腔内压力脉动特征, 指出爆源近区岩体结构性质对爆腔内压力脉动规律影响不大, 爆腔内压力峰值与炸药量无关; 结合热力学和弹性力学知识分析了不同条件下爆炸能量分布规律, 研究了岩体破坏对爆炸能量分布的影响, 给出了岩石断裂破坏消耗能量、变形能、用于抛掷的能量的比例。

关键词: 岩体; 爆腔; 爆炸能量; 离散元

中图分类号: TU45; TD853.34

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)08-1247-06

作者简介: 田振农(1971-), 男, 山东兖州人, 讲师, 从事岩石动力学研究。E-mail: zhennongtian@163.com。

Numerical simulation of pulsation features of pressure in explosion cavity and distribution of explosive energy in rock blasting

TIAN Zhen-nong¹, ZHANG Le-wen¹, LI Shi-hai²

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250016, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: The research status of explosive energy and explosion cavity in rock blasting is analyzed. The computation models of independent development based on the rigid block discrete element method are introduced, including deformed block model, multi-scale model and explosion source. The improved numerical model is suitable for studying the explosion effects in the near-source region. The pressure of explosion cavity and distribution of explosive energy in rock blasting are simulated. According to the simulated results, the pulsation feature of pressure in explosion cavity is obtained. It is pointed out that the rock structure in the near-source region has the little effect on the pulsation pressure in explosion cavity, and that the pressure peak in explosion cavity has nothing to do with the explosive charge. On such a basis, the theory of thermodynamics and elastic mechanics is used to analyze the distribution rules of explosive energy. The influences induced by the failure of rock mass on the distribution of explosive energy are discussed. Finally, the proportion of energy used to fracture rock, deform rock and throw rock block is proposed.

Key words: rock mass; explosion cavity; explosive energy; discrete element

0 引言

炸药在岩石中爆炸时, 首先引起爆腔的扩张, 炮孔附近岩石的塑性变形, 再引起中区岩石的破碎、破裂和抛掷, 最后由于应力波的传播引起远区质点的振动^[1-2]。岩体中爆腔内压力脉动特征和爆炸能量分布对岩体破坏和爆破地震有很大的影响, 涉及岩石非线性下的破坏、多相耦合等, 是一个难度大且涉及面广的重要课题, 对弄清岩体爆破机理有很强的科学意义, 提高爆炸能量的利用效率也是很多岩土爆破工程非常关心的问题^[3]。

由于爆炸是一个高压、高温和高速的瞬态过程, 给直接观测造成了困难, 目前对爆源近区的爆炸效应

还缺乏深入系统的研究^[4-5]。Sharpe等^[6]对临界埋深条件下爆腔内压力进行了理论研究, 如果把岩体看作理想弹性介质, 认为爆腔内压力具有脉动性质; Yang等^[7]进行了炮孔近场破坏状态的试验研究, 测量到炮孔壁上的压力为100 MPa, 而一般认为爆腔内的压力可达10 GPa^[8-9]; 很多学者^[10-14]曾对爆炸能量分布做过一些理论分析工作, 这些研究基本把爆炸能量分为爆炸冲击波能量和爆生气体膨胀能量, 由于计算模型的差别, 导致得出的结果散性较大。夏昌敬^[15]用Ls-dyna

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2009CB724607); 中国博士后科学基金二等资助项目(2090481236)
收稿日期: 2009-04-30

程序对破碎区、损伤区和弹性区的能量分布进行了数值分析; Sanchidrian等^[16]对两个矿石场的爆破进行了长期观测, 结果显示破碎岩体的能量、引起岩块抛掷的动能和引起爆破震动的能量约占爆炸总能量的25%, 而大部分爆炸能量都因为热交换和摩擦耗散掉了。可见, 现场观测和简单的理论分析还未能深刻认识爆腔内压力脉动特征和爆炸能量分布规律, 由于存在力学模型多尺度问题和时间多尺度计算问题, 数值模拟研究也很少。

在块体离散元计算模型的基础上, 采用独立开发的可变形多尺度计算模型和爆源模型^[17-18], 该模型考虑了块体单元的变形性质, 可以对爆源周围岩体进行细化, 并可以根据压力及压力梯度的变化, 采用不同的破坏条件。本文用该模型模拟了岩体内爆腔的扩展过程, 结合理论分析研究了爆腔内压力的脉动特征和爆炸能量的分布规律。

1 计算模型

1.1 计算模型

计算模型如图1所示, 底面固定, 上边界为自由表面, 其它为无反射边界, 每个可变形块体被分为125个六面体单元。爆源在块体单元细化中心, 经过单元细化, 单元最小尺度为1.0 cm, 爆源附近岩体尺度可比爆源远区岩体尺度小2个数量级。块体单元之间为有一定厚度的节理单元, 可以反映实际的岩体结构性质^[19-20]。

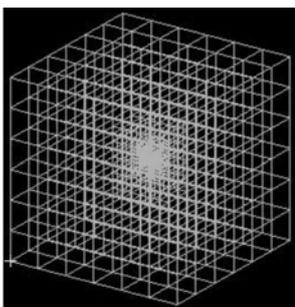


图1 爆源周围单元的划分方式

Fig. 1 Mode of elements around spherical charge

材料参数: 岩体密度=2400 kg/m³, 弹性模量=30 GPa, 泊松比=0.25, 黏聚力=0.8 MPa, 内摩擦角=30°, 阻尼比=0.005。炸药参数: 炸药密度=1000 kg/m³, 爆热=4180 kJ/kg, 爆速=4000 m/s, 多方指数 1=3, 多方指数 2=1.3^[21]。本次所有数值模拟试验均为耦合装药, 且装药密度不变, 即炸药量和装药半径相关。

1.2 主要求解方程

数值计算把研究区域内的介质离散为质点系统, 相比刚性块体单元计算方法, 因为考虑了块体的可变形性质, 不再需要计算绕定轴转动引起的转动位移及

力矩, 求解的方程为

$$M\ddot{\bar{u}}(t) + C\dot{\bar{u}}(t) + K\bar{u}(t) = Q(t) \quad (1)$$

式中, M 是质量矩阵, C 是阻尼矩阵, K 是刚度矩阵, $\ddot{\bar{u}}(t)$ 和 $\dot{\bar{u}}(t)$ 是 t 时刻的加速度和速度向量, $\bar{u}(t)$ 是 t 时刻位移向量, $Q(t)$ 是载荷列阵。

式(1)采用动态松弛法求解, 每个时步内的计算分为两步: ①第一步循环每个可变形块体, 完成相应的连续变形计算; ②第二步根据力边界条件和计算出来的节点位移求解结构层单元上节点的力, 循环所有结构层单元及相应的节点, 可以得到各个可变形块体上的边界力。

根据文献[1], 采用多方气体状态方程计算施加爆炸载荷,

$$PV^\gamma = \begin{cases} P_0V_0^\gamma & (P \geq P_k) \\ P_kV_k^\gamma & (P < P_k) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $\gamma = 3$, $\gamma' = 4/3$; P 和 V 分别为高压气球的瞬态压力和体积; P_k 和 V_k 分别为高压气球在两段绝热过程边界上的压力和体积,

$$P_k = P_0 \left[\frac{\gamma' - 1}{\gamma - \gamma'} \left(\frac{(\gamma - 1)Q_w W}{P_0 V_0} - 1 \right) \right]^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (3)$$

其中, Q_w 为爆热 (kJ/kg), W 为药包质量 (kg); P_0 和 V_0 分别为高压气球初始时刻的压力和药包的体积

$$P_0 = \frac{\rho_w D^2}{2(\gamma + 1)} \quad (4)$$

其中, ρ_w 为炸药的密度 (kg/m³), D 为炸药的爆轰速度 (m/s)

1.3 破坏准则

爆源中区岩石破坏采用脆性破坏准则, 剪切破坏, 属于主要的破坏形式为 $\tau > c + \sigma_n \tan \varphi$, 其中 σ_n 为正压力。该准则不能反映中间应力对材料破坏的影响。

岩石抗拉破坏的表述形式 $\sigma > \sigma_t$, 其中, σ 为拉应力, σ_t 为岩石的抗拉强度。

在爆源近区, 岩石破坏时发生了很大的塑性变形, 采用 D-P 破坏准则,

$$f = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - K = 0 \quad (5)$$

式中, f 为应力函数, I_1 为第一应力不变量, J_2 为第二应力偏量不变量, α , K 是由 φ , c 决定的常数,

$$\alpha = \frac{\sin \varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}, \quad K = \frac{\sqrt{3}c \cos \varphi}{\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}$$

2 爆腔内压力脉动特征

爆腔内压力是研究爆源的重要指标之一, 当药包位置大于临界埋深时, 忽略热交换与爆生气体逸散, 爆腔内将形成一个高压气球。由于岩体的弹性性质,

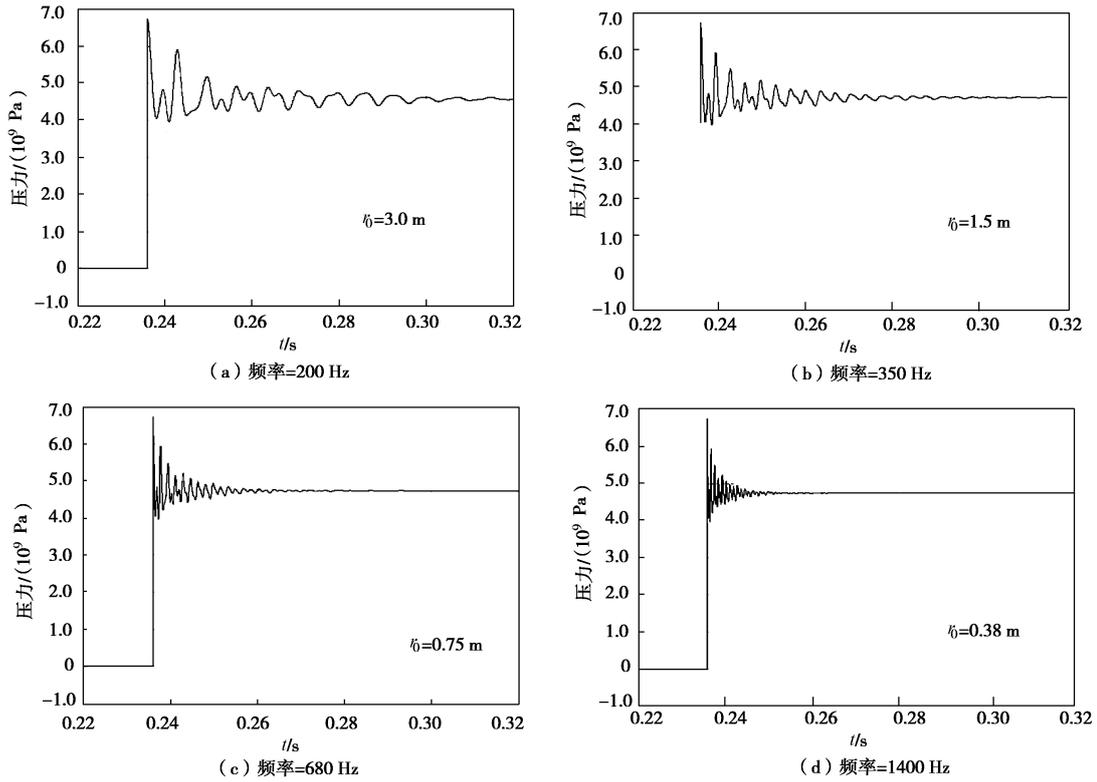


图 2 大于临界埋深时岩体内爆腔压力变化特点

Fig. 2 Variation of pulsation pressure in explosion cavity for charge embedment depth larger than the critical depth

这个高压气球在开始阶段会不断地膨胀 - 收缩, 根据 Sharpe 等的研究结果, 爆腔压力膨胀 - 收缩的频率可以表述为

$$\omega = \frac{2\sqrt{2}v}{3r_0} \quad (6)$$

式中, ω 为圆频率, v 为波在介质中传播的速度 (m/s), r_0 为装药半径 (m)。

图 2 代表了 4 种药量下的爆腔内压力变化特点, 从图中可以看出在相同的介质中, 如果埋深相同且都大于临界埋深, 爆腔内的初始压力和最终平衡后的压力都与炸药量的多少无关, 初始压力由式 (4) 可知, 仅为装药密度、爆轰速度和绝热指数有关; 最终平衡后的压力反映了药爆位置的地应力。另外数值模拟试验结果也反映了爆腔内压力的变化频率与炸药量有密切关系, 随着药量的减小, 爆腔内压力的变化频率逐渐增大, 与药包半径对应的爆腔内压力变化频率如图 3 所示。

图 3 说明从爆腔压力的波动频率上讲, 给出的数值计算结果与 Sharpe 得到的结果非常相符, 为研究岩体中其它爆炸效应提供了一个合理的爆源条件。同用应力函数表达的爆源相比, 该模型提供的爆源不仅能反映爆源应力的变化趋势, 还可以反映出爆腔内压力的波动状态。另外, Sharpe 做理论研究时假设岩石为完全弹性介质, 而该数值模拟研究考虑了岩体的结构, 块体离散元认为块体单元之间存在预设的结构面, 主

要用来实现力和位移的传递, 破坏也发生在这些预设的结构面上。由此说明介质结构对爆腔内脉动特征影响不大。

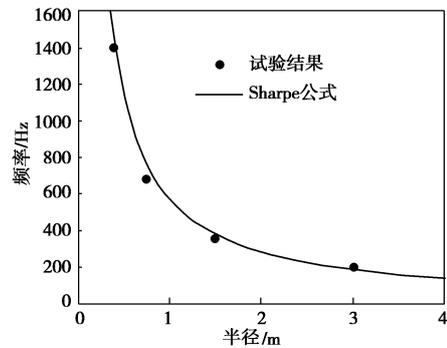


图 3 爆腔内压力脉动特征

Fig. 3 Pulsation features of pressure in explosion cavity

3 岩体中爆炸能量分布

根据热力学理论, 爆腔里的内能 U_1 等于体积为 V 时的气体在真空中膨胀到无穷大时所需的功,

$$U_1 = \int_v^\infty p dV \quad (7)$$

式中, p 为瞬时爆腔内气体压力, V 为瞬时爆腔体积, 爆轰气体状态方程采用式 (2) 的形式, 将其带入式 (7) 得

$$U_1 = \int_v^\infty p_0 \left(\frac{V_0}{V}\right)^\gamma dV = \frac{1}{-\gamma + 1} p_0 V_0^\gamma V^{(1-\gamma)} \quad (8)$$

岩体中的动能为

$$U_2 = \int \frac{1}{2} v^2 dm = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (9)$$

式中, v 为质点运动速度, m 为质点质量。

3.1 不考虑结构面破坏的情况

当炸药量为 125.6 kg, 埋深大于临界埋深, 不考虑爆源周围岩体结构面的破坏, 得到的数值模拟结果如图 4 所示。

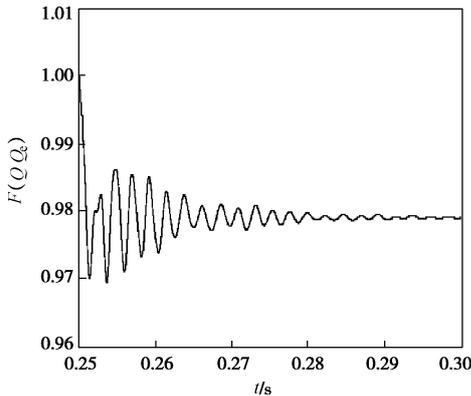


图 4 半无限体中内能变化图

Fig. 4 Variation of internal energy in semi-infinite body

从图 4 中可以看出爆腔中气体存在脉动过程, 爆炸初始时刻爆腔里的内能等于爆炸总能量, 即 $U = QQ_c = 525$ MJ, 其中 Q 为炸药质量(kg), Q_c 为爆热。

从爆炸开始经过 0.03 s 的时间, 爆腔内气体压力与周围岩体内的压力基本达到平衡, 此时爆腔内气体的内能大约为 513 MJ, 内能占总爆炸能的约为 97.7%, 如图 4 所示; 岩体的变形能为 10 MJ, 岩体变形能约占爆炸总能量的 1.7%, 动能基本为零, 如图 5 所示。这 3 部分能量加起来略小于爆炸总能量, 剩余能量为阻尼消耗掉的能量。可见在完整岩体中药包位置远远大于临界埋深时, 不考虑热交换和岩体破坏消耗的能量时, 大部分爆炸能量还在爆腔里作为内能储存着。

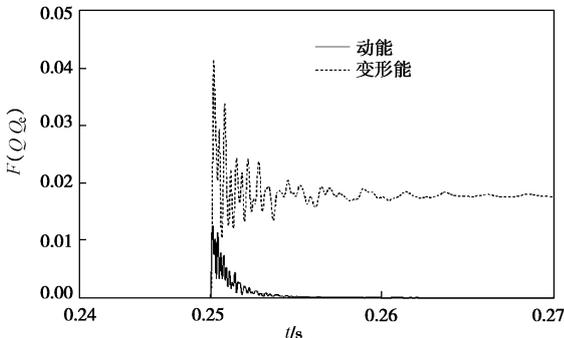


图 5 动能和变形能变化图

Fig. 5 Variation of dynamic and deformation energies

该数值试验假设岩体为弹性介质, 没有考虑爆源周围岩体的破坏效应, 由于垂直方向上药包位置大于临界埋深, 其它方向上都设置无反射边界条件, 因此可以近似为球对称问题。忽略热传递等一切能量耗散,

根据弹性理论, 单位体积内岩石变形能可为

$$\Delta U_3 = \frac{1}{2} [\sigma_r \varepsilon_r + \sigma_t \varepsilon_t] \quad (10)$$

式中, σ_r , σ_t 为径向应力和切向应力, ε_r , ε_t 为径向应变和切向应变,

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - 2\mu\sigma_t], \\ \varepsilon_t &= \frac{1}{E} [(1-\mu)\sigma_t - \mu\sigma_r], \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中, E 为岩体的弹性模量, μ 为岩体的泊松比。

把式 (11) 带入式 (10) 得:

$$\Delta U_3 = \frac{1}{2E} [\sigma_r^2 + \sigma_t^2 - 3\mu\sigma_r\sigma_t - \mu\sigma_t^2] \quad (12)$$

当爆腔里的压力达到平衡时, 岩体内的应力分布可为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -\frac{p_m r^3}{R^3}, \\ \sigma_t &= \frac{p_m r^3}{2R^3}, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中, p_m 为爆腔内的压力达到平衡时的压力, r 为药包半径, R 为质点到药包中心的距离, 于是无限域内岩体的总变形能为

$$\begin{aligned} U_3 &= 4\pi \int_r^\infty \frac{1}{2E} [\sigma_r^2 + \sigma_t^2 - 3\mu\sigma_r\sigma_t - \mu\sigma_t^2] R^2 dR \\ &= \frac{5\pi (1+\mu)}{3E} p_m^2 r^3 \quad (14) \end{aligned}$$

由此可以得到这种情况下岩体内的变形能约占爆炸总能量的 2.6%, 由于没有考虑岩体内阻尼引起能量的消耗, 以及理论推导认为岩块完全静止, 所以该值一定比数值计算得到的值大些。即使如此仍可以看出岩体的变形能所占的部分较少。

3.2 考虑结构面破坏的情况

考虑爆源周围岩体破坏时, 其它条件与 3.1 节数值模拟计算条件相同, 可以得到爆腔里内能的数值计算结果如图 6 所示。数值计算结果显示爆腔内压力达到平衡时, 爆腔里的内能约占爆炸总能量的 84.2%, 与图 3 所示的计算结果比较, 减少了约 13.5%, 由于应力降低, 变形能只可能比原来减少, 因此爆源周围的岩体破碎能量大于 13.5%。考虑实际中存在更细小的破碎面, 爆源周围的岩体破碎能量也会大于 1.3.5%。

3.3 标准爆破漏斗爆破时能量分布

根据利文斯顿对爆破漏斗的计算, 把药包的埋置深度减小到爆破作用指数等于 1 时, 即为标准爆破漏斗试验, 其它计算条件与 3.2 节相同, 数值模拟计算结果得到爆破漏斗如图 7 所示。

爆破漏斗形状是根据位移等值线确定的, 图 7 中药包埋深 5 m, 从模拟结果可以看出药包上覆岩体被破坏, 形成一个“V”形漏斗, 漏斗半径与炸药埋深

相同, 药包下方岩石也出现破坏, 区域较小。

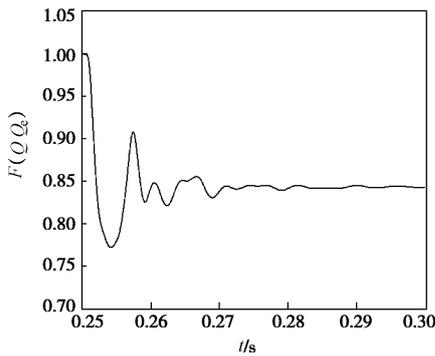


图 6 爆源周围岩体破坏时内能变化图

Fig. 6 Variation of internal energy of rock failure near charge

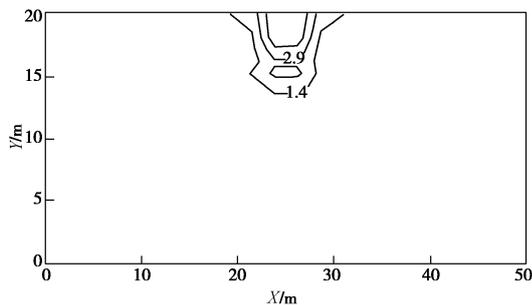


图 7 标准的爆破漏斗模拟图

Fig. 7 Simulation of explosion crater

该数值模拟试验得到内能、动能和变形能结果如图 8, 9 所示。

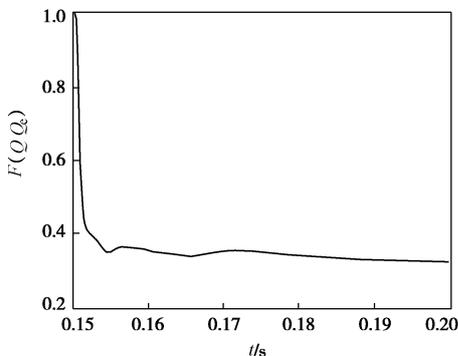


图 8 爆破作用指数为 1 时内能变化图

Fig. 8 Variation of internal energy for explosive index=1

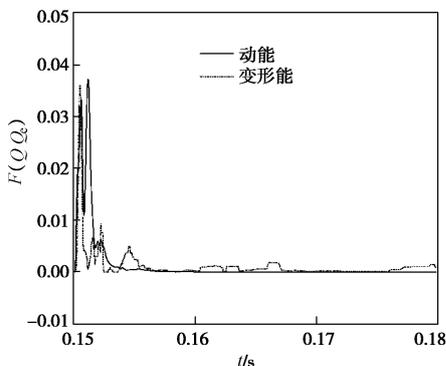


图 9 动能和变形能变化图

Fig. 9 Variation of dynamic and deformation energies for explosive index=1

可以看出爆腔里的内能迅速下降, 不再有脉动现

象, 计算结束时爆腔还在扩展, 实际模型中没考虑气体的逸散, 所以爆腔内的压力也不为零, 还保持有相当的能量。爆腔压力的减少和块体间的断裂, 使岩体内的变形能基本降为零, 阻尼的存在, 使得最后动能也基本为零, 但初始的动能有所增大。如果爆炸后忽略系统阻尼的影响, 可得被抛掷块体单元的动能, 这种情况下爆炸引起的最大动能约占爆炸总能量的 5%, 用于抛掷的能量约占爆炸总能量的 1.5%, 见图 10。

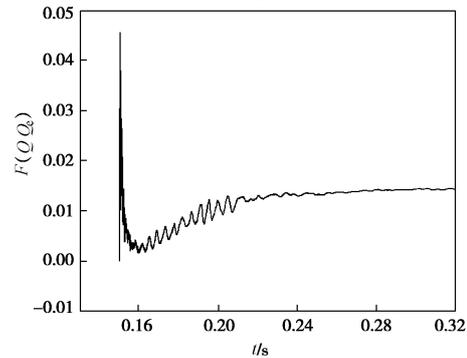


图 10 块体被抛掷消耗的能量

Fig. 10 Throwing energy of rock block

根据以上模拟结果, 内能、动能、变形能存在以下衰减关系:

$$V = Ue^{-(\alpha-\beta)^{\frac{1}{\chi}}t} \sin \frac{k\omega}{n^{\chi}}t \quad (15)$$

式中, E 为内能, U 为爆炸总能量, k 为爆炸后块体平均尺度, n 为爆破作用指数; W 为爆腔压力脉动的圆频率, α, β, χ 为正数, 其中 $\alpha > \beta, \chi > 1$, 能量形式不同时取值不同。

式 (15) 的数学期望: $E(X) = \frac{b}{a(a^2 + b^2)}$, 方差为 $D(X) = \frac{2b(1-a)}{a^4 - b^4} - \frac{b^2}{a^2(a^2 + b^2)^2}$, 其中 $a = (\alpha - \beta)^{\frac{1}{\chi}}, b = \frac{k\omega}{n^{\chi}}$ 。

4 结 论

(1) 离散元是以预设岩体结构面的形式描述岩体性质, 其实质是以复杂的结构代替材料复杂的本构关系, 这些接触面代表了岩体的非均匀性质和各向异性性质。从数值模拟分析结果看, 在爆炸瞬时产生的高温、高压条件下, 爆源近区岩体结构性质对爆腔内压力脉动特征影响不大。

(2) 由于考虑了爆源附近岩体的塑性变形及破坏, 数值模拟得到的爆腔内压力脉动频率小于 Sharpe 的计算结果。

(3) 数值模拟计算结果显示, 当炸药埋深大于临界埋深时, 爆腔内压力脉动特征才明显。爆腔内压力峰值与式 (4) 计算的值相同, 该值与炸药量无关。

(4) 一般岩体爆破中, 岩体破碎能量约占爆炸总能量 14%, 爆破震动的能量约占爆炸总能量 5%, 标准爆破漏斗爆破情况下用于抛掷岩块的能量约占爆炸总能量 1.5%, 其它能量约占爆炸总能量 75%, 因为热交换和摩擦耗散掉了。可见提高爆炸能量的利用效率对岩土爆破工程意义重大。

参考文献:

- [1] 亨利奇 J. 爆炸动力学及其应用[M]. 熊建国, 等译. 北京: 科学出版社, 1987: 504 - 508. (HENRYCH J. Dynamic mechanics and application of explosion[M]. XIONG Jian-guo, et al tran. Beijing: Science Press, 1987: 504 - 508. (in Chinese))
- [2] DUVAL W I. Strain-wave shape in rock near explosions[J]. Geophysics, 1953, **18**(2): 310 - 323.
- [3] A review of theoretical investigation on rock blasting[C]// Fragblast 7, Rock Fragmentation by Blasting.
- [4] WANG Xu-guang, ZHOU Jia-han, WANG Zhong-qian. Development of blasting technique in China[C]// Fragblast 7, Rock Fragmentation by Blasting.
- [5] CHARLES H Dowing, Blast Vibration Monitoring and Control[M]. 1985.
- [6] SHARPE J A. The production of elastic waves by explosion pressure: II Result of obervation near an exploding charge[J]. Geophysics, 1942(7): 311 - 321.
- [7] YANG R L, ROCQUE P. Blast damage study by measurement of blast vibration and damage in the area adjacent to a blast hole. FRAGBLAST-4[C]// Proceedings 4th International Symposium on Rock Fragmentation by Blastin, 1993.
- [8] 孟吉复, 惠鸿斌. 爆破测试技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992. (MENG Ji-fu, HUI Hong-bin. Blasting test technology[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992. (in Chinese))
- [9] Per-Anders Persson, Roger Holmberg, Jaimin Lee. Rock blasting and explosives engineering[M]. CRC Press, 1992.
- [10] 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). (ZONG Qi, YANG Lu-jun. Shock energy distribution of column charge in rock[J]. Blasting, 1999, **16**(2). (in Chinese))
- [11] 曹祺, 颜事龙, 韩早. 岩石爆破中爆炸能量分布规律的研究现状[J]. 煤矿爆破, 2007, **79**(4). (CAO Qi, YAN Shi-long, HAN Zao. Status and development of explosive distribution in rock blasting[J]. Mining Blasting, 2007, **79**(4). (in Chinese))
- [12] 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, **308**(2). (XU Ying, DING Guang-ya, ZONG Qi, et al. Study on the characteristics of rock fragmetation and energy distribution by blast stress wave[J]. Metal Mine, 2002, **308**(2). (in Chinese))
- [13] 吴亮, 卢文波, 宗琦. 岩石中柱状装药爆炸能量分布[J]. 岩土力学, 2006, **27**(5). (WU Liang, LU Wen-bo, ZONG Qi. Distribution of explosive energy consumed by column charge in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, **27**(5). (in Chinese))
- [14] 肖志武, 李必红. 球形装药在无限岩石介质中爆炸能量分布研究[J]. 矿业研究与开发, 1999, **19**. (XIAO Zhi-hong, LI Bi-hong. Study about distribution of explosive energy to spherical charge in infinite media[J]. Mining R & D, 1999, **19**. (in Chinese))
- [15] 夏昌敬, 鞠杨, 谢和平. 爆炸载荷下岩石损伤与能量耗散的数值分析[J]. 弹道学报, 2006, **18**(3). (XIA Chang-jing, JU Yang, XIE He-ping. Numerical analysis of damage and energy dissipation in rock under blast loading[J]. Journal of Ballistics, 2006, **18**(3). (in Chinese))
- [16] JOSE A Sanchidrian, PABLO Segarra, LINA M Lopez. Energy components in rock blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, **44**: 130 - 147.
- [17] 田振农, 李世海. 多尺度离散元计算方法及其在岩土爆破中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(1): 3009 - 3016. (TIAN Zhen-nong, LI Shi-hai. Calculation method of structural surfaces with different scales by DEM and its application to blasting in geotechnical engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(1): 3009 - 3016. (in Chinese))
- [18] 田振农, 李世海. 三维块体离散元可变形计算方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(增刊 1): 2832 - 2840. (TIAN Zhen-nong, LI Shi-hai. The study of deformable calculation method on base of the three-dimensional block discrete element method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(S1): 2832 - 2840. (in Chinese))
- [19] ZHANG L, WEI Z, LIU XY, LI Shi-hai. Application of three-dimensional discrete element face-to-face contact model with fissure water pressure to stability analysis of landslide in panluo iron mine[J]. Science in China Series E-Engineering & Materials Science 2005, **48**(S1): 146 - 156.
- [20] LI S H, ZHAO M H, WANG Y N, et al. A new numerical method for DEM-block and particle model[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 2004, **41**(3): 436 - 436.