

文章编号: 1000-7598-(2007) 08-1615-06

岩石时效损伤模型及其在工程爆破中应用

王志亮¹, 郑田中², 李永池¹

(1. 中国科技大学 近代力学系, 合肥 230022; 2. 浙江温州市水利局堤塘管理处, 温州 325000)

摘要: 为了实现爆破智能化, 降低爆破带来的负面影响, 通过数值模拟预估出岩体中爆破诱发损伤的大小以及分布范围在工程上具有重要意义, 其中科学合理的爆破损伤模型是关键。基于岩石介质是连续的、各向同性的、且存在初始裂纹的假设, 把考虑时效的岩石拉裂损伤演化方程和双线性弹塑性本构结合起来, 通过用户自定义简明地嵌入到大型 LS-DYNA 软件中, 并引入了该软件中的侵蚀算法, 对半无限岩体中临空面附近爆破漏斗问题进行了重点数值模拟, 计算结果比较接近实际。本文方法在工程中将具有一定的参考价值。

关键词: 爆破; 微裂纹; 时效损伤; 侵蚀算法; 爆破漏斗; 数值模拟

中图分类号: TB 41

文献标识码: A

Time effect damage model of rock mass and its application to blasting engineering

WANG Zhi-liang¹, ZHENG Tian-zhong², LI Yong-chi¹

(1. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Seawall Management Service, Wenzhou Water Resources Bureau, Wenzhou 325000, China)

Abstract: In order to achieve intelligent blasting and reduce the blast-induced adverse influences, the prediction of rock damage and its distribution scope through numerical simulation is of importance in engineering. Thereinto, the reasonable damage constitutive model for rock is crucial. By assuming that the rock mass is an isotropic and continuous material with pre-existing random initial microcracks, an available rock tensile damage evolution equation considering time effect is coupled with the bi-linear elastoplastic constitutive model. Then they are succinctly incorporated into the transient dynamic code, LS-DYNA, via its user defined subroutine. In addition, the erosion algorithm in LS-DYNA is employed. The tensile damage and blasting crater near the free-surface of semi-infinite rock mass is numerically simulated; and the numerical results are satisfactory. This method presented herein has some reference value in rock blasting.

Key words: blasting; micro-crack; time effect damage; erosion algorithm; blasting crater; numerical simulation

1 前言

工程爆破中炸药导致岩石的损伤破碎在开采业和建筑业中是较常见的。在工程设计阶段, 若通过数值法, 预估出爆破诱发的损伤大小和其存在范围, 具有重要意义, 其中合理的岩石爆破损伤模型的采用是关键^[1,2]。

Grady 和 Kipp^[3] 于1980年提出的岩石爆破各向同性损伤模型(GK 模型)被公认为是较早的一个损伤模型, 随后出现了TCK(1986年)模型^[4]和Kusmaul

(1987年)模型^[5]等, 它们均基本上假定岩石处在拉应变下时其中的微裂即被激活与扩展, 裂纹密度 C_d 在岩石损伤本构中是一个重要的指标, 但各自的损伤演化方程不尽相同。

半无限岩体介质中工程爆破是生产实践中最常见的, 该类型爆破的特点是数值计算边界存在临空面(或自由面)。根据介质爆破理论和应力波知识, 高温、高压爆轰波在离炮孔稍远处演化为应力波, 而应力波对岩石的破坏损伤具有重要作用。一般认为应力波先把岩体中预裂纹激活, 而爆轰气体则随

后钻进裂纹使其进一步成长甚至贯通, 这个过程是不可逆的。当应力波遇到临空面时, 反射为拉伸波, 拉伸波的峰值强度一旦超过介质的抗拉强度, 就会在介质内产生拉裂破坏区, 这个拉裂破坏范围的合理确定, 对临空面附近建(构)筑物的保护以及整个施工的安全都具有重要参考价值。

本文基于大型有限元分析软件LS-DYNA的接口功能^[6], 把考虑时效的岩石损伤演化规则和材料的双线形弹塑性本构耦合起来, 并嵌入到该动力分析软件中, 对单临空面、半无限岩体中爆破诱发损伤演化规律和损伤分布趋势进行深入探讨, 为工程实践提供一定的借鉴。

2 数值分析工具

本文采用著名的显式动力分析有限元软件LS-DYNA来完成计算的。与其他的动力有限元程序一样, LS-DYNA企图寻找一个满足位移和应力边界的动量方程的求解方法, 其能量方程采取对时域积分, 评价整个系统的状态方程以及全局的能量守恒。程序中使用的是中心差分法积分方案^[6, 7]。

3 材料的本构关系

3.1 岩石弹塑性损伤模型

岩石中的缺陷和裂纹在爆炸载荷下会被激活、扩展, 新的裂纹也将伴随出现, 裂纹密度整体提高, 导致岩体的刚度和强度降低。连续介质的损伤力学对描述爆轰波下的岩石损伤过程是比较恰当的^[2]: 一般地, 用应变球张量 ε_m 表示为纯体积的变化, 而纯形状变化的是通过应变偏张量 e_{ij} 来体现的。笔者认为, 体应变 ε_v 是一个随时间变化的量, 它决定着裂纹是否被激活、扩展乃至贯通。

$$\varepsilon_v = 3\varepsilon_m = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \quad (1)$$

如果岩石介质受到拉载作用, 只要其体内拉应力值不超过其屈服应力 σ_0 , 岩石单元均不会发生破坏和损伤, 此时的体应变称之为临界体应变:

$$\varepsilon_c = \frac{1-2\nu}{E} \sigma_0 \quad (2)$$

当体应变 ε_v 小于 ε_c 时, 岩体中微裂纹系统保持不变; 当 ε_v 大于或等于 ε_c 时, 微裂纹就被激活。可见微裂纹的激活和扩展需要有一个较高的应力水平, 但是若外力作用时间较短, 裂纹也不一定被激活的, 故而裂纹密度可表达如下^[8-10]:

$$C_d = \alpha(\varepsilon_v - \varepsilon_c)^\beta t \quad (3)$$

式中: t 为时间; α 、 β 为材料参数。

方程式(3)的形式与金属疲劳损伤中的帕里斯定律^[8]有点类似, 该定律融合了连续损伤力学的机理, 用来描述金属材料损伤中裂纹的增长。为了编程的需要, 裂纹密度的差分格式表达如下:

$$dC_d = \alpha\beta(\varepsilon - \varepsilon_c)^{(\beta-1)} t d\varepsilon_v + \alpha(\varepsilon_v - \varepsilon_c)^\beta dt \quad (4)$$

基于裂纹密度和统计断裂力学理论, 将损伤变量 D 定义为特定裂纹密度下岩体破坏失效的概率^[9, 10]:

$$D = 1 - \exp(-C_d^2) \quad (5)$$

岩石介质的损伤必然导致其强度上的劣化:

$$E_d = E(1 - D) \quad (6)$$

式中 E 、 E_d 分别为未损伤和已损伤岩石的弹性模量。

泊松比 ν 与岩体中的裂纹类型有关, 而裂纹类型一般预先是不知道的。当裂纹是扁圆的或张开形状的, 岩石的有效泊松比要小于其固有的泊松比; 当裂纹是闭合的, 则有效泊松比要大于固有的泊松比, 可取平均效应, 即暂不考虑泊松比的损伤劣化效应。

当岩石介质受拉且 ε_v 大于 ε_c 时, 其应力-应变关系的增量式为

$$\Delta\sigma_{ij} = K_d \delta_{ij} \Delta\varepsilon_{kk} + 2G_d \Delta e_{ij} \quad (7)$$

式中: 有效体积模量 K_d 和有效剪切模量 G_d 均可由 E_d 和 ν 计算出。对于其他情形, 设岩石介质行为服从双线性弹塑性模型^[7, 9], 其屈服函数为

$$\varphi = \Lambda^2 - \sigma_y^2 \quad (8)$$

式中: $\Lambda = \sqrt{\frac{3}{2}(s_{ij} - \alpha_{ij})(s_{ij} - \alpha_{ij})}$; 应力偏量 s_{ij} 与移动张量 α_{ij} 的增量表达式为

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (9)$$

$$\Delta\alpha_{ij} = \frac{2}{3} (1 - \psi) E_p \dot{\varepsilon}_{ij}^p dt \quad (10)$$

有效塑性应变 ε_{eff}^p 和当前屈服极限 σ_y 表示为

$$\varepsilon_{eff}^p = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3}} \dot{\varepsilon}_{ij}^p dt \quad (11)$$

$$\sigma_y = \sigma_0 + \psi E_p \varepsilon_{eff}^p \quad (12)$$

式中: E_p 为塑性硬化模量; ψ 为硬化参数。

式(8)中, 当 $\varphi \leq 0$ 时, 为弹性或中性加载;

$\varphi>0$ 为塑性硬化。 t_{n+1} 时刻的有效塑性应变修正值以及应力分别为

$$(\varepsilon_{\text{eff}}^p)^{n+1} = (\varepsilon_{\text{eff}}^p)^n + \Delta\varepsilon_{\text{eff}}^p \tag{13}$$

$$\sigma_{ij}^{n+1} = S_{ij}^{n+1} + p^{n+1}\delta_{ij} \tag{14}$$

式中

$$S_{ij}^{n+1} = S_{ij}^* - \sqrt{6}G\Delta\varepsilon_{\text{eff}}^p \tag{15}$$

$$\Delta\varepsilon_{\text{eff}}^p = \frac{\Lambda - \sigma_y^n}{3G + E_p} \tag{16}$$

式中： S_{ij}^* 为应力偏量试探值； σ_y^n 为 t_n 时刻的屈服极限； p^{n+1} 为 t_{n+1} 时刻静水压力。

3.2 炸药的状态方程

本文采用JWL状态方程^[7, 11]来模拟炸药：

$$p = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V} + \frac{\omega E}{V} \tag{17}$$

式中： A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 均为材料参数； p 为压力； E_0 为单位体积介质的初始内能；相对体积 $V = \rho_0/\rho$ ， ρ_0 和 ρ 分别为介质的初始密度和当前密度。这些参数由标准的气缸膨胀试验确定，且相互制约，不可随意更改其中任何一个值。

4 数值计算与分析

计算中的乳化(emulsion)炸药^[12]密度 $\rho_0 = 13.1$ kN/m³，爆速 $D_{C-J} = 5\,500$ m/s，压力 $P_{C-J} = 9.9$ GPa。其余参数见表 1，岩石介质本构参数见表 2，其中 $\psi = 1$ 表明子程序中采用各向同性硬化； β 取值为 2.0 是为了满足断裂应力为荷载速率的三次方根^[10]； a 可依据爆破漏斗的计算大小（直径与深度）与试验得出的实际体积对比而尝试给出的，是一个可调值^[10, 13, 14]。

表 1 炸药状态方程参数
Table1 Parameters for explosive state equation

A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E_0 /MJ·m ⁻³	V_0
214.4	0.182	4.2	0.90	0.15	4 192	1.0

表2 岩石本构参数^[8]
Table 2 Parameters for rock model

ρ / kN·m ⁻³	E / GPa	ν	σ_0 / MPa	ψ	a	β	ε_c
25.5	51.8	0.33	250	1.0	7.0×10^{10}	2.0	0.141×10^{-3}

4.1 单临空面半无限岩体中柱形药包爆破

设炮孔和地表垂直，圆柱形药卷（耦合装药）截面半径为 5.0 cm，长 50.0 cm。炸药上方堵塞长度为 50.0 cm。图 1 给出了其几何尺寸，整个计算域为

200.0 cm × 150.0 cm。
由于是单临空面半无限体，且采用孔底中心点起爆方式，故可视为轴对称问题来处理。根据结构对称性，取右 1/2 模型作为研究对象。靠近炮孔的网格单元大小化分为 2 cm × 2.5 cm，随着离炮孔距离的增大网格尺寸逐渐增大。

边界条件如下：左边界为对称边界，上表面为临空自由边界，下边界和右边界均为透射边界。计算中炸药和岩石的参数见表 1、表 2。对于炸药上方的堵塞材料，为了简化处理，假设其和周围的岩石具有相同的参数。

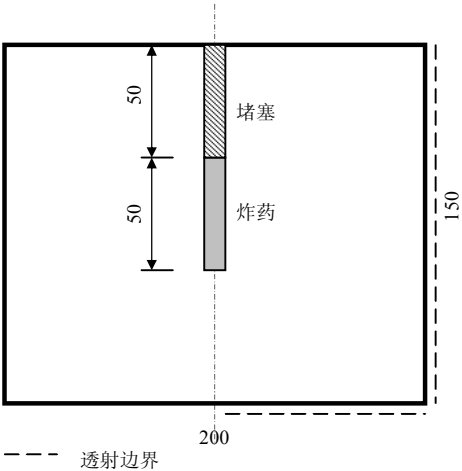


图 1 实际模型示意（单位：cm）
Fig.1 Schematic of practical model(unit: cm)

图 2 为两个典型时刻的损伤分布云图。清楚可见损伤由两部分组成：柱形炮孔周围损伤区域是由较高的径向、切向拉应力形成的，从药卷顶部到地表间的损伤区域是由应力波在地表的反射拉裂形成的，0.2 ms 时应力波已在地表附近产生拉裂损伤，2 ms 的损伤区域要比 0.2 ms 的明显大些，此后随着时间的延长损伤范围不再增大且基本稳定下来，最终在地表形成一个“爆破漏斗”。

由于 LS-DYNA 计算中要求介质是连续的，因此爆破造成的介质抛掷现象不能模拟的。实际上，这个“爆破漏斗”中部分岩石碎块要抛射出去的^[13]。为了清楚地显示爆破漏斗形状，本文在所编的本构字程序中采用了“侵蚀”算法：设定单元的拉裂损伤临界值为 0.6，一旦某个单元的损伤超过这个值，该单元就被立即删去，且这个删除过程是不可逆的。上述的损伤临界值可根据实际的爆破试验结果来予以校准的。图 3 显示了单元删去后的情形并圈出了爆破漏斗的形状，其口部半径约为 80 cm，深度约为 65 cm。这个“爆破漏斗”范围合理地确定具有

重要意义,它关系到该范围内的建筑物安全和土石方的开挖费用等。

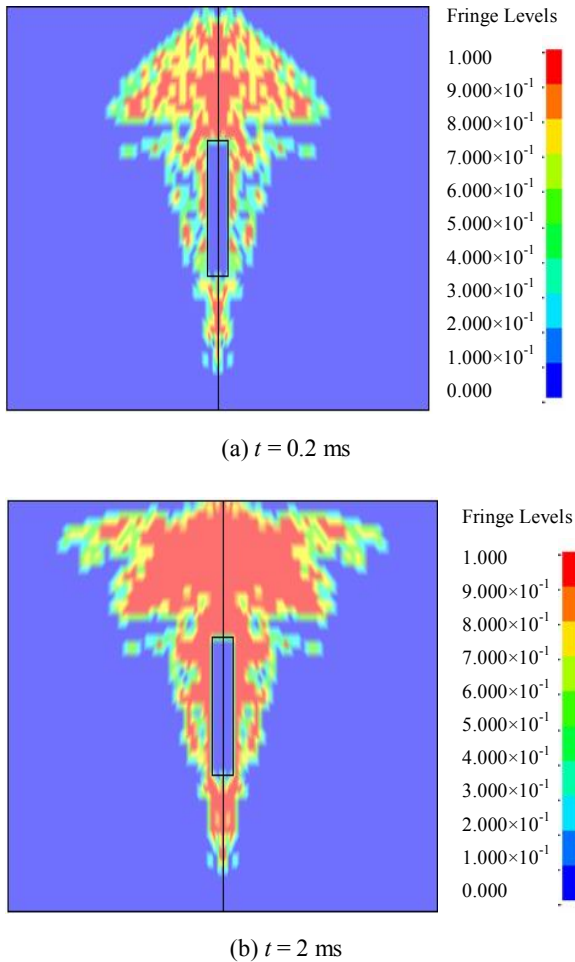


图 2 两个时刻损伤分布

Fig.2 Damage distribution at two different times

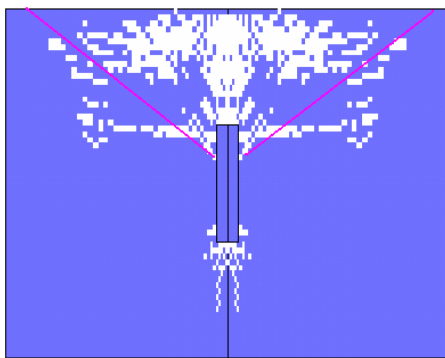


图 3 2 ms 的爆破漏斗形状

Fig.3 The shape of blast crater at $t = 2 \text{ ms}$

4.2 单临空面半无限岩体中球形药包爆破

生产实践中经常会遇到半无限岩体球形药包爆破工况,同样可采用该损伤本构对其进行探讨。

某实例中,球形药包半径为 10.0 cm,采用耦合方式装药,球形药包中心到地表的距离为 1.0 m,计算域范围为 600 cm×400 cm。设炸药从中心起爆,

则同样可作为轴对称问题来处理。根据结构对称性,取右 1/2 区域来建模,计算范围实为 300 cm×400 cm。计算中边界条件规定和上例相似:左边界为对称边界,下、右边界为透射边界,上边界为自由边界。计算中炸药和岩石参数同表 1 和表 2。

图 4 为计算所得的 2 ms 的损伤分布,由于所选用的炸药的威力较低且当量小,故而形成的完全损伤区域很小。药腔周围一定区域内出现完全损伤区域,其中径向和切向拉裂纹同时存在。地表自由面附近反射波也产生了不连贯的损伤区域。在同样的损伤临界值下,图 5 中给出了大致的爆破漏斗形状,其口部半径和深度分别约为 40 cm 和 85 cm。另一方面,若炸药埋设较深的话,上、下两个损伤区域之间会出现明显的间断,即类似于“瓶颈”现象,下方爆破损伤区会被岩石包围住,不易开挖。

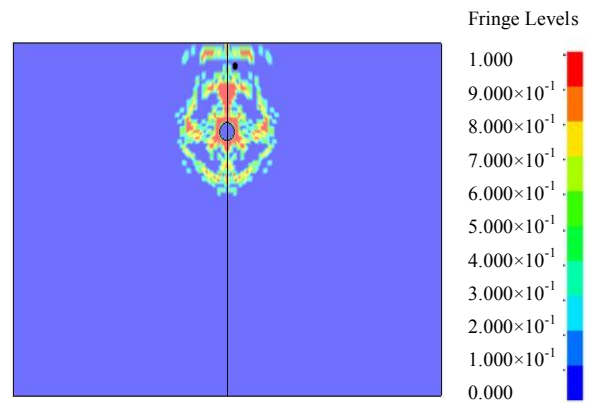


图 4 在 2 ms 时的损伤分布

Fig.4 Damage distribution at $t = 2 \text{ ms}$

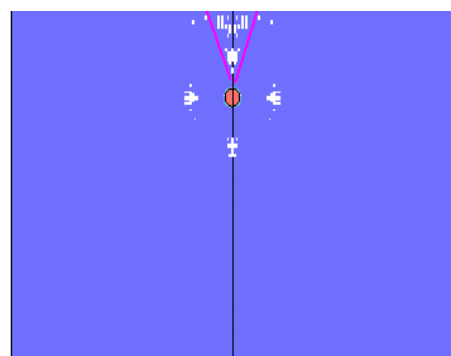


图 5 2 ms 的爆破漏斗形状

Fig.5 The shape of blast crater at $t = 2 \text{ ms}$

图 6 为单元 7 099 的压力时程曲线。该单元靠近地表,其中心在地表下约 29.0 cm,离左对称边界约 14.2 cm (图 4 中黑点)。可以看出该单元刚开始为压应力,接着受地表自由面反射波的影响而转为拉应力,随后应力波逐渐衰减到 0。这个拉应力波的峰值为 107.5 MPa,足以使岩石单元发生拉裂破

坏, 伴随裂纹产生。

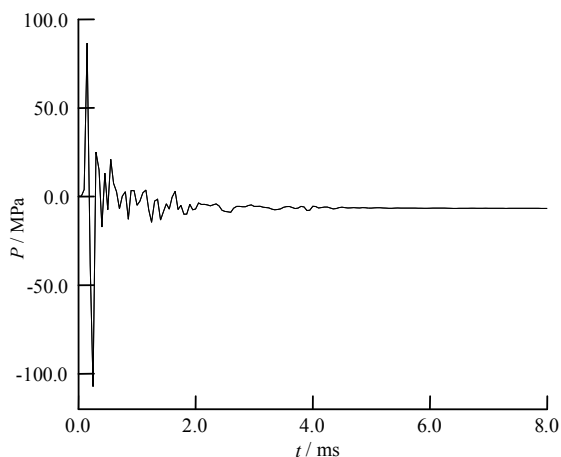


图 6 单元 7 099 处的压力时程曲线
Fig.6 Pressure history for element 7 099

4.3 单临空面半无限岩体中深孔爆破

下面来数值模拟一个深孔爆破工程实例, 炮孔直径为 9 cm, 长 600 cm, 药柱上方的堵塞长 150 cm, 整个计算域的范围界定为 1 000 cm×1 050 cm。根据对称性取 1/2 建模, 计算模型大小为 500 cm×1 050 cm (图 7)。堵塞材料设与周围被爆岩石材料相同, 炸药采用底部中心点起爆, 问题具有轴对称特点, 因此可将此问题简化为二维问题。由于炸药尺寸相对于整个计算域太小, 所以网格划分较密, 共有 76 050 个单元。计算中选用的参数和上两例类似。

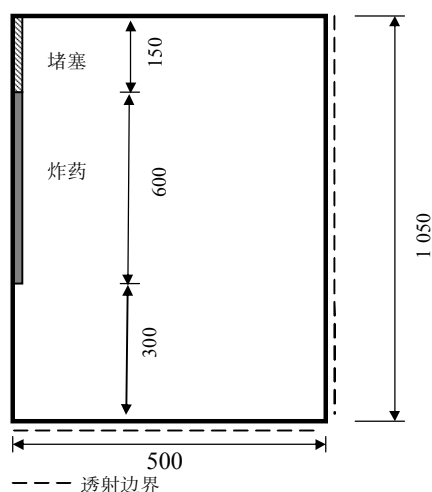


图 7 深孔数值计算模型 (单位: cm)
Fig.7 Calculation model for deep-hole calculation (unit: cm)

图 8 为 2.4 ms 的损伤分布计算结果。在炮孔周围半径 20 cm 范围内, 岩石介质被彻底破碎, 呈现

出完全损伤 ($D = 1.0$), 其外围是裂纹区, 药柱底端的裂纹范围最大半径为 45 cm, 药柱上端附近的裂纹区最大半径达到 75 cm, 从下到上呈增大趋势。

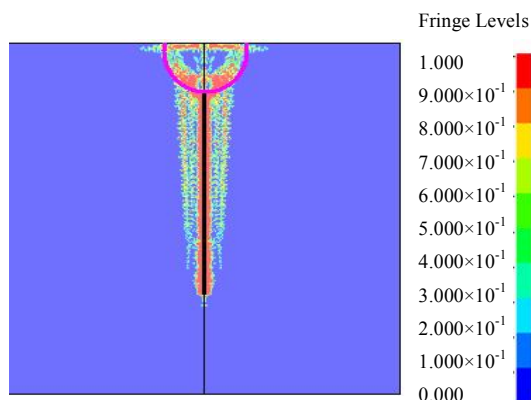


图 8 2.4 ms 的爆破漏斗形状
Fig.8 The shape of blast crater at $t = 2.4$ ms

地表附近明显可见, 反射拉伸波形成的爆破漏斗, 其口部半径为 130 cm, 深度约为 150 cm。这和长科院的小湾水电站现场测试试验^[14, 15]所得的结果比较接近(尽管二者岩性不同, 但主要参数相近), 从而也间接验证了本文所开发的子程序合理性。

目前大多设计单位在岩石爆破的数值模拟中, 采用的材料本构不能确定出拉裂损伤分布的范围, 这在爆破近区破坏规律的探讨以及降低爆破带来的损失上是难以满足生产需要的。通过上述算例可以发现, 本文的时效损伤本构具有一定的参考价值。

5 结 论

岩石动态本构关系是研究岩石中爆炸损伤机理、应力波传播与衰减规律以及地下结构破坏效应等不可缺少的前提条件。通过研究可以得出:

(1) 时效损伤本构中各参数物理意义明确, 且比较容易获取, 根据对比“爆破漏斗”的体积、形状来调整控制参数 a 使得该模型具有较强的适用性;

(2) 本文方法既能给出炮孔周围不同时刻的径向、环向波导致的拉裂损伤大小及分布区域, 又能对地表附近的反射波形成的拉裂损伤、爆破漏斗进行较合理的预估, 这在实现工程爆破智能化, 减少爆破负面影响, 保证施工安全等方面均具有一定的应用前景;

(3) 采用 LS-DYNA 的侵蚀算法, 设定校准的损伤临界值, 经过数值处理后可较清晰地模拟碎石飞出后的爆破漏斗的大致形状, 这点在工程中应用价值较大且国内报道得较少。

参考文献

- [1] 单仁亮, 薛友松, 张倩. 岩石动态时效损伤模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (1): 1 771—1 776.
SHAN Ru-liang, XUE You-song, ZHANG Qian. Time dependent damage model of rock under dynamic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(1): 1 771—1 776.
- [2] 杨军, 高文学, 金乾坤. 岩石动态损伤特性实验及爆破模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20 (3): 320—323.
YANG Jun, GAO Wen-xue, JING Qian-kun. Experiment on dynamic damage property of rock and new damage model for rock fragmentation by blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(3): 320—323.
- [3] Grady D E, Kipp M E. Continuum modeling of explosive fracture in oil shale[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, 1980, 17: 147—157.
- [4] Taylor L M, Chen E P, Kuszmaul J S. Micro-crack induced damage accumulation in brittle rock under dynamic loading[J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering**, 1986, 55: 301—320.
- [5] Kuszmaul J S. A new constitutive model for fragmentation of rock under dynamic loading[A]. **2nd International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting**[C]. Canada: Keystone, 1987: 412—423.
- [6] LSTC, LS-DYNA Keyword User's Manual[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [7] Hallquist J O. LS-DYNA Theoretical Manual[M]. California: [s. n.]. Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [8] Chen W R, Keer L.M. Fatigue crack growth in mixed mode loading, **Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME**, 1991, 113(2): 222—227.
- [9] Yang R, Bawden W F, Katsabanis P D. A new constitutive model for blast damage[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 1996, 33(3): 245—254.
- [10] Liqing Liu, Katsabanis P D. Development of a continuum damage model for blasting analysis[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1997, 34(2): 217—231.
- [11] Liu Z Y, KUBOTA S, ITOH S. Numerical study on hypervelocity acceleration of flyer plates by overdriven detonation of high explosive[J]. **International Journal of Impact Engineering**, 2001, 26: 443—452.
- [12] Dobratz B M, Crawford P C. LLNL explosives handbook: properties of chemical explosives and explosive stimulants, Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.
- [13] Liu L, Katsabanis P D. A numerical description of the formation of a crater in rock blasting[J]. **CIM (Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum) Bulletin**, 1998, 91(1023): 75—81.
- [14] 王志亮. 基于LS-DYNA的工程爆破效应数值分析与岩石爆破损伤本构研究[D]. 合肥: 中国科技大学博士后研究报告, 2006.
- [15] 长科院爆破研究所. 小湾高边坡开挖爆破可行性研究报告[R]. 武汉: 长江科学研究院, 2005.

书 讯

岩土塑性力学基础(第2版)

作者: 张学言, 闫澎旺 编著 图书分类: 建筑设计 ISBN: 7561820216
 出版时间: 2006-9-1 出版社: 天津大学出版社

本书主要介绍岩土弹塑性本构关系理论与模型及塑性极限荷载分析理论。内容包括应力与应变理论、岩土类材料的屈服与强度理论、弹塑性本构关系理论与计算模型及岩土类材料极限荷载分析的滑移线场理论和上限及下限分析理论。同时还简要介绍了近年来发展和完善起来的广义塑性力学、双剪应力系列屈服与破坏理论。本书主要适用于岩土工程专业及土木、水利、公路、港口及海洋工程等相关专业的硕士研究生教学, 亦可供上述相关工程的岩土工程科技人员和教学人员参考。

(摘自新书城)