

文章编号: 1001-1455 (2000)03-0241-06

应力波衰减基础上的岩石爆破损伤模型

杨 军, 金乾坤

(北京理工大学, 北京 100081)

摘要: 在 TCK 损伤模型基础上, 考虑岩石冲击损伤过程的声波测试衰减规律, 构造新的岩石爆破损伤模型。将该模型装进 LS-DYNA3D 动态有限元程序, 通过岩石冲击损伤实验验证该程序的计算结果, 并用新模型实现了岩石台阶爆破数值计算。

关键词: 岩石爆破; 损伤模型; 衰减系数; 数值计算

中图分类号: TD235.1 文献标识码: A

1 引言

损伤力学的发展及其在岩石力学领域的应用, 使我们可以用连续介质力学的方法, 唯象地确定岩石类含有微损伤场(节理、裂隙、孔洞等)损伤材料的物性方程和损伤演变规律。国内外有关研究证明, 建立在损伤理论基础上的岩石爆破损伤模型, 是新近发展起来的较能客观反映岩石爆破物理过程的一种理论模型。近年来对冲击载荷作用下岩石损伤过程的波速衰减规律的研究^[1~2], 使细观破坏特征的测量分析与岩石损伤演化过程联系起来, 开辟了用声学参量表达损伤程度的研究途径。

根据损伤力学理论, 损伤并不是一种独立的物理性质, 而是泛指材料内部的一种劣化因素, 与所涉及的材料及其所处环境密切相关。这种劣化的力学效应是材料应力-应变曲线出现“应变软化”, 即内部微细结构的局部应力场重新分布, 同时泊松比下降和体积应变改变。通过引入表征材料内部微细缺陷的损伤内变量, 建立合适的损伤模型, 在不可逆热力学和连续介质力学的均衡定律基础上导出损伤本构关系, 用损伤广义力表征微细观缺陷损伤的作用和影响, 建立唯象的损伤演变方程, 对材料的损伤进行描述和分析。岩石爆破损伤模型正是这种唯象方法的一个实例。

由于损伤裂纹的存在和发展会引起应力波波速的衰减, 所以波速衰减系数和损伤参量之间的关系对损伤岩石中的应力波传播具有重要作用^[3]。Rubin 和 Ahrens 采用了如下损伤参量表达式^[4]

$$D = 1 - (c/c_0)^2 \quad (1)$$

式中: c 为受载损伤后岩石的波速, c_0 为受载前岩石的波速。由于 $(c/c_0)^2$ 是受载损伤前后岩石弹性模量之比, 所以 D 表述的是岩石的相关模量的变化。实验证明损伤参量与超声波波速

* 收稿日期: 1999-08-26; 修回日期: 1999-11-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(59872031); 教育部博士点科学基金

作者简介: 杨 军(1960—), 男, 博士, 副教授。

衰减率在动载作用过程中呈线性关系,进一步的研究还发现声速衰减率与损伤能量耗散率具有显著的线性相关性^[5]。这些均为用声波参数参与构造损伤模型提供了理论依据。

2 岩石爆破损伤模型

美国 Sandia 国家实验室在 80 年代初开始研究的岩石爆破损伤模型^[6] (TCK 模型)是针对油母页岩开采爆破研究需要推出的数值计算模型。经 Kipp、Grady、Taylor、Chen 和 Kus 等人十余年的努力,最后由 Thorne 进一步修正,成为能够模拟脆性岩石动态破碎过程的二维数值计算模型,并在美国油页岩矿爆破实践中进行了现场应用。

岩石爆破损伤模型主要由裂纹密度、损伤演化规律以及有效模量表达的应力应变关系三部分组成^[7]。

岩石中的损伤裂纹密度可表示为

$$C_d = \frac{5k(\theta - \theta_d)^m}{2} \left(\frac{K_{Ic}}{\rho c \theta_{\max}} \right) \quad (2)$$

式中: k 、 m 为材料常数; ρ 为材料密度; c 为声波速度; θ 为体积应变; θ_d 为扩容应变; θ_{\max} 为最大应变率; K_{Ic} 为断裂韧性。

损伤参量可表为

$$D = 1 - \frac{K_e}{K} = \frac{16}{9} \left(\frac{1 - \nu_e^2}{1 - 2\nu_e} \right) C_d \quad (3)$$

式中: K_e 为有效体积模量; K 为体积模量; ν_e 为有效泊松比,可表为泊松比 ν 与损伤参量 D 的函数^[6],也可表为

$$\nu_e = \nu \left(1 - \frac{16}{9} \right) C_d \quad (4)$$

根据连续介质力学的唯象法,损伤材料的本构关系可表为

$$P = 3K_e(\theta - \theta_d) \quad (5)$$

$$S = 2G_e e = 3K_e(1 - 2\nu_e)e / (1 + \nu_e) \quad (6)$$

式中: P 为体积应力; S 为应力偏量; G_e 是剪切模量; e 是应变偏量。

以上方程形成闭合的本构关系方程组,即岩石爆破损伤模型。

损伤模型的实用性就在于能够满足对生产实践中爆破过程的数值计算,而且所需的参量必须便于获得。上述损伤模型只考虑了损伤存在引起岩石等效模量降低问题,而没有考虑伴随损伤演化过程的能量耗散问题。而损伤能量耗散率在损伤力学中是损伤发展的判据,反映了损伤这个相当复杂的固体物理过程中能量耗散的不可逆性。TCK 模型的不足还在于裂纹密度及相关参量的获取极其困难,要克服这一不足必须寻求新的损伤表达方式。

3 建立在波衰减系数基础上的岩石爆破损伤模型

岩石冲击损伤实验和回收样品的超声波测试^[8] 为建立新的岩石损伤模型提供了实验基础。而从中提炼出的损伤耗散能与衰减系数的关系以及衰减系数和损伤变量之间的关系则为损伤演化方程的建立提供了理论依据。与损伤变量及其演化方程有关的材料参数的确定则是建立损伤模型的关键。通过分析岩石冲击实验的结果,建立以波衰减为基础的岩石损伤模型^[5];然后将所建立的损伤模型加到 LS-DYNA 有限元程序中,通过模拟轻气炮实验过程,将实

验所测的压力曲线与模拟所得的压力时间曲线进行对比来校核模型中所涉及的材料参数;最后利用校核过的损伤模型对工程爆破问题进行模拟。

3.1 损伤判据的建立

由于 TCK 模型体积拉伸损伤准则忽视了在体积压缩状态下材料也会发生断裂损伤的可能性,因此采用最大主应力准则和体积拉应力准则联合判据判断是否产生损伤累积。认为材料只要满足最大主应力准则($\sigma_1 \geq \sigma_f$, σ_f 是断裂应力)就发生断裂。一旦材料断裂且处于体积拉伸状态(体应力 $P > 0$ 或者体积应变 $\theta > 0$)则产生损伤累积;而在体积压缩状态下,如果最大主应力准则满足,则置压缩强度 $Y = 0$, 否则压缩强度服从与应变率有关的 Mohr-Coulomb 准则,即 $Y = C_1(1 + C_2 \ln \theta_p) + C_3 P$, 其中 C_1 、 C_2 和 C_3 为常数。在拉、压两种情况下,只要损伤参量 D 达到 1, 单元即丧失承载能力,压力和偏应力均被置零。

3.2 损伤演化方程的建立

在体积受拉状态下,岩石受冲击载荷作用的主要破坏与微裂纹的拉伸激活有关。岩石冲击实验和超声波实验研究揭示了应力波在损伤岩石中传播时的衰减特性,即随着损伤的不断增加,应力波在其内传播时的衰减愈大,表现为衰减系数的不断增加,因此可得衰减系数和损伤耗散能之间的关系式^[8]

$$\alpha = \alpha_0 + K_\alpha Y_D \quad (7)$$

式中: K_α 是衰减系数与损伤耗散能关系的拟合常数; Y_D 是损伤耗散能; α_0 为岩石介质的初始衰减系数。

随着应力波的传播和损伤的演化,介质的衰减系数增加,其损伤程度亦越来越大。损伤参量与衰减系数之间的关系为线性关系式

$$\alpha = A + BD \quad (8)$$

将式(7)、(8)写成率形式为

$$\dot{\alpha} = K_\alpha \dot{Y}_D \quad (9)$$

$$\dot{D} = C \dot{\alpha} \quad (10)$$

式中: C 是材料常数; $Y_D = \alpha \theta$ 。式(9)、(10)为体积拉伸下的损伤演化方程。

体积压缩状态下的损伤演化方程基于 RDA 模型^[9]的应变率效应耦合原则,可表为

$$\dot{D}_c = \lambda W_p / (1 - D) \quad (11)$$

式中: λ 是损伤敏感参数; W_p 是压缩塑性功率; D 是拉伸损伤参量。

3.3 动态本构关系

损伤对材料刚度的劣化表现为

$$\sigma_{ij} = 3K_e \theta \hat{\delta}_{ij} + 2G_e e_{ij} \quad (12)$$

上式的偏量部分和体积部分形式如式(5)、(6)。式中 K_e 和 G_e 为损伤岩石的体积模量和剪切模量; D 为损伤参数; e_{ij} 为应变偏量张量; $\hat{\delta}_{ij}$ 是单位张量。式(9)~(12)构成了损伤模型的封闭方程组。

3.4 模型的实验验证

将上述损伤模型加入到 LS-DYNA 的用户自定义的材料模型中,详细算法流程如图 1 所示。

第1步,先计算弹性体积应力 P 和最大主应力 σ_1 ,如果单元处于体积压缩状态,进入第二步;

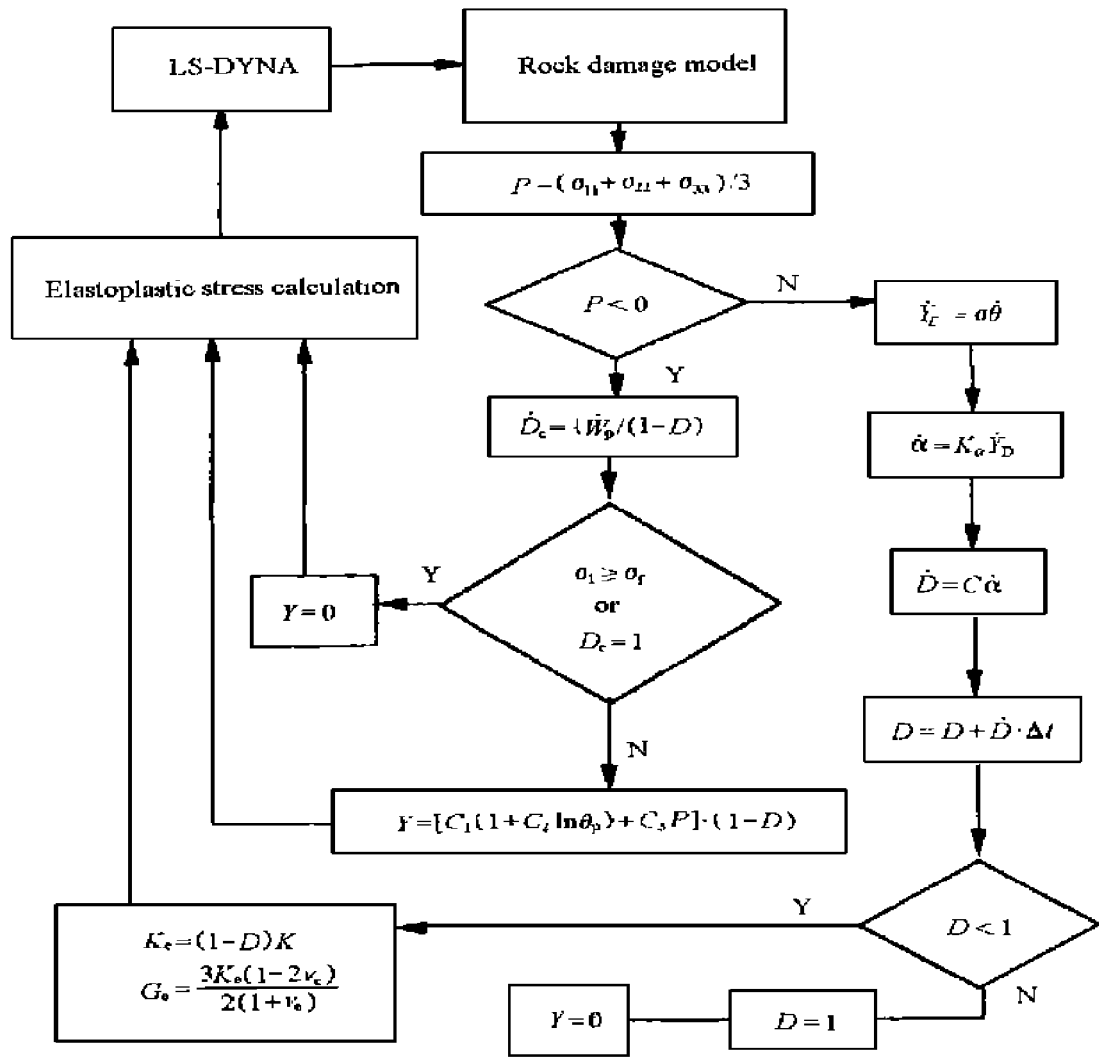


图1 岩石爆破损伤模型计算流程图

Fig.1 Compute routine for new damage model

否则进入第3步。

第2步, 计算损伤 D_c , 如果 $\sigma_1 \geq \sigma_f$ 或者 $D_c = 1$, 则单元丧失承载能力, 置屈服强度 $Y = 0$; 否则计算屈服强度, 进入第3步。

第3步, 根据应力、应变率计算损伤耗散能的变化率 $Y_D = \sigma \dot{\theta}$, 计算 α 、 D , 然后计算衰减系数 α 和损伤变量 D , 如果 $\sigma_1 \geq \sigma_f$ 或者 $D = 1$, 单元丧失承载能力。

用上述程序对砂岩冲击损伤实验进行了数值模拟, 通过实测压力曲线对式(9)、(10)中的拟合参数进行校核。图2是98109B(碰撞速度为272m/s)实验的冲击压力曲线与模拟结果的比较, 由图可见模拟结果与实测曲线比较吻合。

模拟计算中砂岩的冲击损伤参数为: $\rho = 2614 \text{kg/m}^3$, $K = 44.35 \text{GPa}$, $\nu = 0.28$, $K_\alpha = 10^{-5}$, $C =$

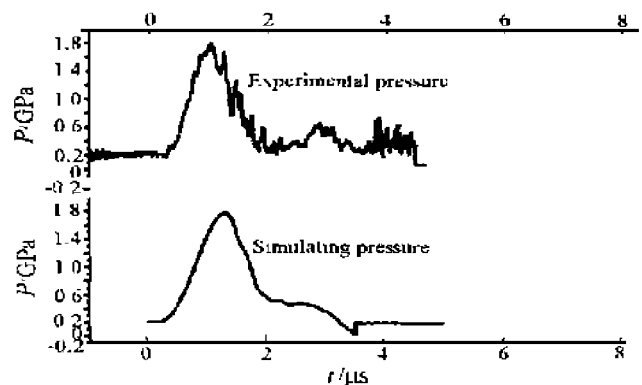


图2 实验98109B的冲击压力与模拟结果

Fig.2 The shock pressure and its numerical simulation for test 98109B

0.48, $\lambda=2.2 \times 10^{-4} \text{kg/J}$, $C_1=150 \text{MPa}$, $C_2=0.05$, $C_3=0.3$, $\sigma_f=200 \text{MPa}$ 。

4 应用实例

将新构造的损伤模型加入到 LS-DYNA 程序对台阶爆破问题进行模拟。有限元计算剖面如图 3 所示。炸药为乳化炸药, 岩石为砂岩, 材料参数同上节, 炸药参数见表 1。

图中的剖面(前面)为对称面, 背面为非反射边界, 起爆方式为孔底起爆, 计算终止时间为 5ms。采用 JWL^[5] 状态方程模拟炸药爆轰过程中压力和比容的关系

$$P = a \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + b \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{E_0}{V} \quad (13)$$

式中: a 、 b 、 R_1 、 R_2 、 ω 是炸药的参数; P 是体应力; V 是相对体积; E_0 是初始体积内能。

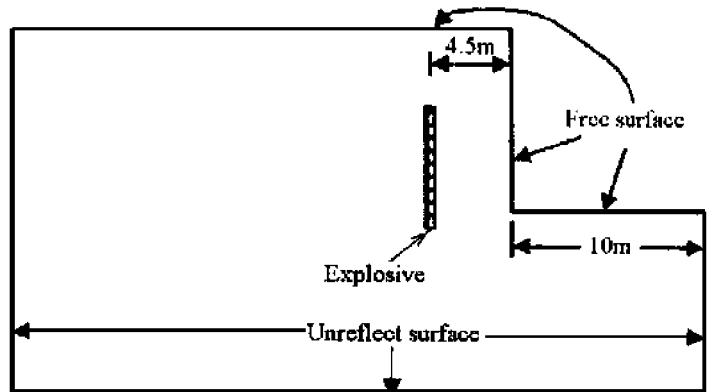


图 3 有限元计算几何剖面图
Fig.3 The geometric section of finite element calculation

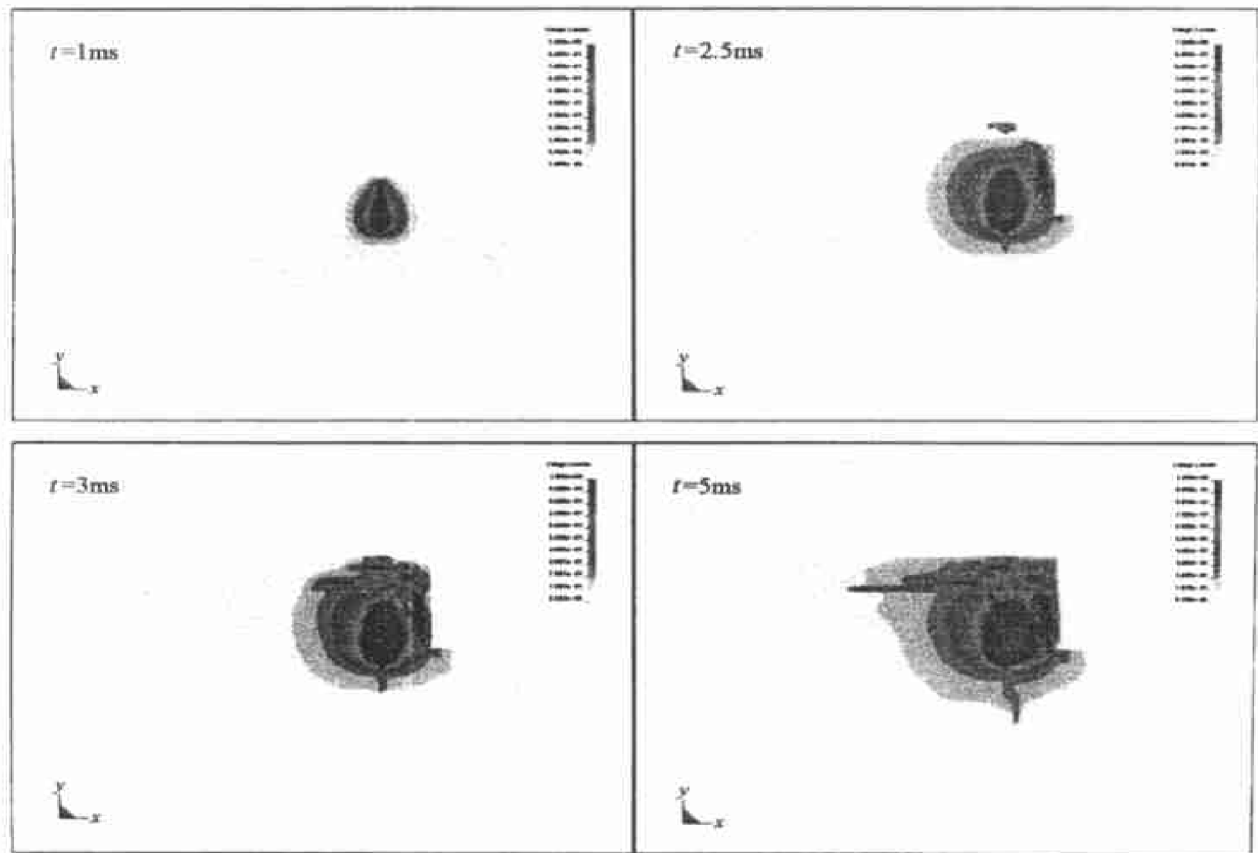


图 4 不同时刻损伤分布

Fig.4 The damage distribution on rock during blasting

图 4 给出了对称平面上的不同时刻的损伤分布, 图中灰度 (Light-to-dark) 损伤范围是 0 ~ 1.0。时间分别为 1、2.5、3 和 5ms。由图可见从 2.5ms 开始有自由面反射作用, 尽管损伤主要

集中在药包周围,自由面作用形成的损伤破坏区域占据的比例更大。根据以上分析及由损伤推断破碎范围可得,本文计算的破碎区范围与台阶爆破实际较为接近。

表 1 炸药的参数

Table 1 The parameters of the explosive

| $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$ | $D/(\text{m}/\text{s})$ | a/GPa | b/GPa | R_1 | R_0 | ω | E_0/GPa |
|-------------------------------|-------------------------|----------------|----------------|-------|-------|----------|------------------|
| 1310 | 5500 | 214.4 | 0.182 | 4.20 | 0.90 | 0.15 | 4.192 |

5 结论及展望

建立在应力波衰减理论基础上的新岩石爆破损伤模型,能够客观地反映岩石在爆炸载荷作用下的损伤演化状况,可以方便地用于岩石爆破工程的数值模拟。该模型实验手段成熟,具有广泛的应用前景。此研究还需经多种岩石冲击实验以便得到完善和充实。

参考文献:

- [1] Thomas J A, Allan M R. Impact-induced Tensional Failure in Rock[J]. J Geo Res, 1993, 98(E1): 1185—1203.
- [2] Liu C, Thomas J A. Stress Wave Attenuation in Shock-Damaged Rock[J]. J Geo Res, 1997, 102(B3): 5243—5250.
- [3] He Hongliang, Ahrens T J. Mechanical Properties of Shock-Damaged Rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1994, 31(5): 525—533.
- [4] Rubin A M, Ahrens T J. Dynamic Tensile Failure Induced Velocity Deficits in Rock[J]. Geophys Res Lett, 1991, 18(2): 219—223.
- [5] 杨 军, 金乾坤, 黄风雷. 岩石爆破理论模型和数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 74—85.
- [6] Kusmaul J S. A New Constitutive Model for Fragmentation of Rock under Dynamic Loading[A]. 2nd Int Symp on Rock Fragn by Blast[C]. 1987. 412—424.
- [7] Grady D E, Kipp M E. Mechanisms of Dynamic Fragmentation: Fractors Governing Fragment Size [R]. SAND-84-2304c, 1985.
- [8] 高文学. 岩石动态响应特性及其损伤模型研究[D]. 北京: 北京理工大学, 1999.
- [9] Furlong J R, Davis J F, Alme M L. Modeling the Dynamic Load/Unload Behavior of Ceramics under Impact Loading [R]. RDA-TR-0030-0001, Arlington, VA: R & D Associates, Arlington, 1990.

A New Damage Model for Rock Fragmentation by Blasting Based on Stress Wave Attenuation

YANG Jun, JIN Qian-kun

(Department of Engineering Safety, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A new damage model has been developed for rock blasting, which is based on the existing TCK models. The attenuation on wave velocity is used to define damage parameter and its evolution. In order to verify the new models and obtain material parameters, the rock shock-induced experiments on light-gas gun have been done. Simulation results indicates that the calculation by using the new models can satisfy the need of engineering practice.

Key words: rock blasting; damage model; attenuation coefficient; numerical simulating