文章编号：1001-1455(2003)03-0241-07

单孔台阶爆破中保留岩体损伤特征的数值模拟*

刘　军，王树仁，高全臣
（南京理工大学动力学院，江苏 南京 210094）

摘要：为了描述露天矿单孔台阶爆破中预留岩体在爆炸冲击载荷下的损伤演化特征，建立了一个各向异性的损伤模型。模拟结果表明，该损伤模型能够模拟岩石材料在冲击载荷下的损伤特征，可以为岩土工程中经历过冲击扰动作用的岩体的稳定性分析提供理论依据。

关键词：固体力学；损伤模型；各向异性；爆炸冲击载荷；数值模拟
中图分类号：O346.5；TD824.71　　国标学科代码：130°1540　　文献标志码：A

1　引　言

在岩土工程中广泛采用爆破技术，爆破作用在破碎需要开挖岩体的同时，也对需要保留的岩体造成损伤。无论何种控制爆破方式，炸药爆炸的冲击载荷都在破坏确定范围的岩土介质的同时，也对邻近需要保护的岩体产生强烈扰动（损伤），受损岩体在上覆岩层的压力作用下，会使损伤进一步加剧，从而使得岩层的承载力以及稳定性降低。围岩稳定性的评价一定要考虑爆破等冲击载荷引起的损伤，该问题的研究已成为矿山采掘工程以及边坡工程中迫切需要解决的问题。爆炸的强冲击扰动对围岩产生何种程度的损伤，不同位置和不同性质的岩体受损伤后的承载性能有何变化，这些问题的研究对于爆破参数的合理设计、围岩的有效加固和高边坡工程的稳定支护设计都具有十分重要的理论和实际指导意义。目前有关这方面的研究还主要采用现场实验基础上的统计方法来描述保留岩体在爆炸冲击载荷下的损伤特征[1~4]。统计方法比较直观，便于应用，但由于缺乏理论基础，并在不同的条件下具有较大的离散性，所以难以令人信服。此外，目前的研究都没有对爆破作用下保留岩体损伤的分区特征进行详细的描述。

在本文中，采用一个能够反映岩体在冲击载荷作用下的响应特点及能够描述损伤演化的各向异性特征的损伤模型，来模拟保留岩体在爆炸冲击载荷下的损伤特征。模拟结果较好地反映了爆炸冲击载荷下保留岩体的损伤分布规律，可以为边坡的稳定性分析提供参考。

2　损伤模型

2.1　损伤变量

假设岩体中含有大量的 Griffith 裂纹，用裂纹的半径与法向矢量构造的二阶张量作为损伤变量。

考虑一个体积为 V_0 含有 n 条微裂纹的材料单元，单元的微观结构可用下面一组基本内变量表征

$$\xi = \{\xi_1, \xi_2, \cdots, \xi_n\} \qquad \xi_\alpha = \{\boldsymbol{n}^\alpha, r_\alpha\} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{n}^\alpha$ 与 r_α 分别为第 α 个微裂纹的法向矢量与半径。

为了减少基本内变量的数目，引入 m（$m \ll n$）个损伤矢量 ζ_μ（$\mu=1, 2, \cdots, m$）作为 ξ 的平均值

$$\zeta = \{\zeta_1, \zeta_2, \cdots, \zeta_m\} \qquad \zeta_\mu = \{\boldsymbol{n}_\mu, \omega_\mu\} \tag{2}$$

式中：第 μ 个损伤矢量 ζ_μ 为在全部微裂纹中一组近似平行的 n_μ 个裂纹的平均。$\boldsymbol{n}_\mu$ 与 ω_μ 由下式定义，不失一般性，去掉下标 μ

* 收稿日期：2002-06-26；修回日期：2002-09-10
作者简介：刘　军（1969－　），男，博士，工程师。

$$\boldsymbol{n}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{n}^{i},\qquad \omega=\frac{1}{V_0}\sum_{i=1}^{n}r_i^3 \tag{3}$$

在损伤矢量的基础上构造二阶损伤张量[5]

$$\Omega=\sum_{\mu=1}^{m}\omega_\mu\boldsymbol{n}^\mu\boldsymbol{n}^\mu \tag{4}$$

ω取为裂纹瞬时半径的三次方形式，如果所有的裂纹都恰好互相平行，那么损伤张量就是二阶构造张量

$$\Omega=\frac{1}{V_0}\sum_{\alpha=1}^{n}r_\alpha^3\boldsymbol{n}^\alpha\boldsymbol{n}^\alpha \tag{5}$$

2.2 本构方程

因为应变的影响，损伤张量 Ω 与弹性模量 $\boldsymbol{D}$ 的关系一般取为 $\boldsymbol{D}=\boldsymbol{D}(\Omega,\varepsilon)$。为了避免复杂的表达，岩石材料的真实应力状态可以用一个等价状态来近似，通过这个等价状态，本构方程有着简单的形式 $\boldsymbol{D}=\boldsymbol{D}(\Omega)$。忽略基质材料的塑性变形，只考虑弹性变形与损伤引起的变形的耦合，这样本构方程可以表示为

$$\sigma=\boldsymbol{D}(\Omega):\varepsilon-g\Omega \tag{6}$$

式中：$\Omega=\boldsymbol{P}^+:\Omega$，$P_{ijkl}^+=Q_{ik}^+Q_{jl}^+$，$\boldsymbol{Q}^+=\sum_{v=1}^{3}H(\varepsilon_v)\boldsymbol{p}^v\boldsymbol{p}^v$，$H(\circ)$为 Heaviside 函数，$\boldsymbol{p}^v$ 与 ε^v 为应变 ε 的第 v 个主方向矢量与主值，g 是一个假设的非负的材料常数[5~6]。

2.3 依赖于损伤变量的弹性模量

在本构方程中，假设弹性模量仅为损伤变量的函数，利用张量代数及热力学的基本原理，推导依赖于损伤的弹性张量 $\boldsymbol{D}(\Omega)$表达式。一般说来，损伤张量应满足连续力学原理：(1)对称条件要求 $D_{ijkl}=D_{jikl}=D_{ijlk}=D_{klij}$；(2)材料对称条件要求 $\boldsymbol{D}(\Omega)$是一个各向同性的张量函数；(3)正定条件要求弹性势函数 $W=\frac{1}{2}\varepsilon_{ij}D_{ijkl}\varepsilon_{kl}$是关于 ε_{ij} 的正定函数。

引入一个中间二阶张量 Φ_{ij}，定义弹性张量

$$D_{ijkl}=\lambda\Phi_{ij}\Phi_{kl}+\mu(\Phi_{ik}\Phi_{jl}+\Phi_{ij}\Phi_{jk}),\qquad \Phi_{ij}=C_1\delta_{ij}+C_2\Omega_{ij}+C_3\Omega_{im}\Omega_{mj} \tag{7}$$

式中：C_1、C_2、C_3 为 Ω_{ij}不变量的函数，λ 与 μ 恰好为材料初始状态的 Lamé 常数。

一个正交的损伤变量便于运算，假定

$$\boldsymbol{D}=\begin{cases}\boldsymbol{D}^0 & \Omega=\boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \Omega=\boldsymbol{I}\end{cases} \tag{8}$$

式中：$\boldsymbol{D}^0$ 为材料初始的各向同性的弹性模量。C_1、C_2、C_3 应该满足下列关系

$$C_1=1\qquad \Omega=\boldsymbol{0};\qquad C_1+C_2+C_3=0\qquad \Omega=\boldsymbol{I} \tag{9}$$

如果进一步假定 C_1、C_2、C_3 为材料常数，并结合对 Φ_{ij}的正定要求，可得

$$C_1=1,\qquad C_2=-k,\qquad C_3=-(1-k)\qquad 0\leqslant k\leqslant 1 \tag{10}$$

这样，只有一个依赖于材料的常数 k。

2.4 损伤演化方程

演化方程以文献[5~7]为基础，从基本内变量的演化方程逐步推导出平均损伤矢量与损伤张量的演化方程，最后，仿照塑性力学中屈服面的处理方法，将带有“尖点”的损伤面逐步光滑处理。损伤演化方程如下

$$\dot{\Omega}=\frac{1}{\rho}\boldsymbol{J}:\boldsymbol{Y} \tag{11}$$

式中

$$\boldsymbol{J}=\boldsymbol{J}(\Omega)=\sum_{v=1}^{3}\omega_v^2\left(4\boldsymbol{T}_v+\frac{9}{4}\boldsymbol{N}_v\right) \tag{12}$$

$$\boldsymbol{N}_v = \boldsymbol{n}^v \boldsymbol{n}^v \boldsymbol{n}^v \boldsymbol{n}^v \tag{13}$$

$$\boldsymbol{T}_v = (T^v_{ijkl}) \qquad T^v_{ijkl} \frac{1}{2}(n^v_i n^v_k \delta_{jl} + n^v_i n^v_l \delta_{jk} + n^v_j n^v_k \delta_{il} + n^v_j n^v_l \delta_{ik}) - n^v_i n^v_j n^v_k n^v_l \tag{14}$$

式中：v 表示三个主方向，$v=1,2,3$；ω_v 与 $\boldsymbol{n}^v$ 定义见(4)式；ρ 为裂纹密度；δ_{ij} 为 Kronecker 符号。

2.5　损伤面方程

损伤准则采用断裂力学中的能量准则，认为裂纹的扩展发生在能量释放率最大值的方向。因此，损伤面方程可以表示为

$$\Gamma = \Pi - R \tag{15}$$

式中：$\Pi^2 = \frac{1}{2}\boldsymbol{Y} : \boldsymbol{J} : \boldsymbol{Y}$，$R$ 为裂纹的扩展阻力，即当前的损伤门槛值，$\boldsymbol{Y}$ 为损伤张量 Ω 的热力学对偶力

$$\boldsymbol{Y} = -\frac{\partial \phi}{\partial \Omega} = \frac{1}{2}\varepsilon : \frac{\partial \boldsymbol{D}(\Omega)}{\partial \Omega} : \varepsilon \tag{16}$$

在冲击载荷的条件下，由于裂纹扩展的滞后，使得损伤的演化呈现粘性特征，即对应变率具有敏感性。为此，引入损伤粘性流动函数 F[8]，对损伤门槛值进行粘性调整。因此，损伤门槛值的变化率

$$\dot{R} = uF(\Pi, R) \geqslant 0 \tag{17}$$

式中：u 为控制材料粘性流动的常数，F 为损伤粘性流动函数

$$F(\Pi, R) = R_0 \left[\frac{\langle \Pi - R \rangle}{R} \right]^a \tag{18}$$

式中：R_0 为材料的初始损伤门槛值，a 为正指数，为材料常数，可由单轴拉力实验得出，$\langle \cdot \rangle$为 Macaulay 括号。

这样，由(6)～(7)、(11)、(15)式及质量、动量和能量守恒方程即可构成一个闭合的方程组。

3　保留岩体损伤的数值模拟

3.1　输入参数

把上述损伤模型用FORTRAN语言编写成子程序，嵌入ABAQUS有限元软件中。单孔爆破的台阶高度10m，采用多孔粒状铵油炸药，其JWL状态方程参数（各参数含义见文献[9]）分别为：$A=191.21$GPa，$B=0.164$GPa，$R_1=4.2$，$R_2=0.9$，$\omega=0.15$，$E_0=2.8$MJ/kg，$D=2700$m/s，$\rho_0=1.10$g/cm^3。孔深 10m，孔径 250mm，装药高度 6m，填塞高度 4m，抵抗线 4m，共装药 320kg。

网格的划分见图1，网格的尺寸为1m，采用六面体单元，单元总数为10360，节点总数为11928。计算区域内输入的岩体参数分别为：$E=68$GPa，$\nu=0.21$，$k=1.0$，$R_0=70$MPa，$g=65$MPa，$\rho_0=3.47$g/cm^3，$u=870$s^{-1}，$a=5$。计算时间为 15ms，时间步长为 1μs，只分析炮孔后部的损伤变化情况，输出结果为损伤张量的最大主值分量。在炮孔后部，每隔 5m 取一个剖面，输出结果的 6 个剖面位置见图 2。

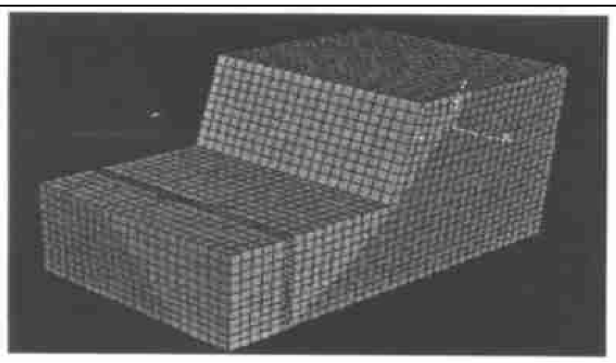

图 1 有限元网格

Fig.1 Finite element mesh

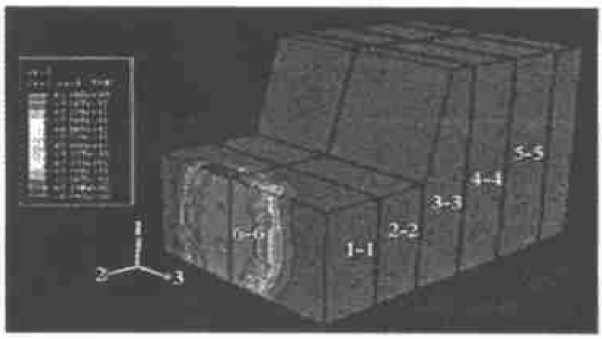

图 2 输出结果的六个剖面

Fig.2 Six sections for results output

在计算区域内采用 T.Kawamoto 提出的方法对裂纹进行统计[10]。T.Kawamoto 假设节理裂隙都是平面的，并且认为岩体是由许多无损岩块组成，节理与裂隙存在于各岩石块的边界上，并沿这些边界扩展，而不会延伸到岩石块的内部，岩石块的尺寸由平均裂隙间距确定。在这些假设的基础上，对所要分析区域内岩体中的概化优势节理裂隙（即在概率上占绝对优势的节理裂隙）进行统计分析，可以得到计算区域内的初始损伤张量。由 T.Kawamoto 方法得到的初始损伤张量为

$$\Omega_0 = \begin{bmatrix} 0.8823\times10^{-5} & -0.4847\times10^{-5} & 0.2316\times10^{-5} \\ -0.4847\times10^{-5} & 0.4474\times10^{-5} & 0.2169\times10^{-5} \\ 0.2316\times10^{-5} & 0.2169\times10^{-5} & 0.6513\times10^{-5} \end{bmatrix} \tag{19}$$

3.2 模拟结果及分析

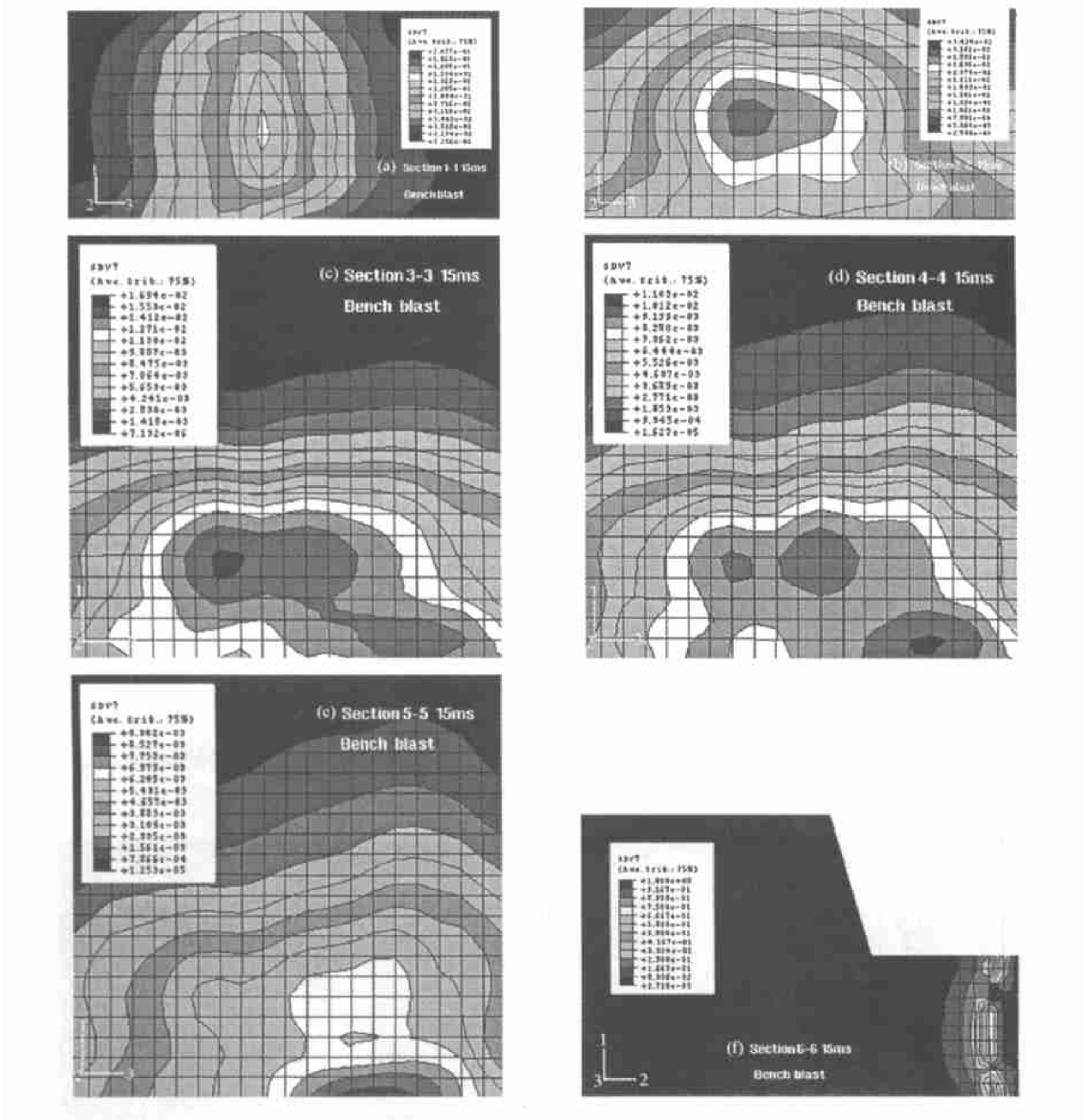

图 3 六个剖面在 15ms 时刻的损伤场

Fig.3 The damage field of six sections at 15ms

从五个垂直剖面在计算终了时刻(15ms)的损伤等值线图(图 3(a)～(e))可以看出，损伤核(损伤最大的等值线)出现在距台阶坡顶面约三分之二台阶高度的位置，随着距爆源距离的增加，损伤核逐步下移，并且形成了两个核，之后损伤核扩散，损伤的分布趋于均匀。

从径向剖面的损伤轮廓图(图 3(f))中可以发现，在爆破近区，损伤值较大，随着距爆源距离的增加，损伤值急剧下降，这说明在爆破近区，存在着一个损伤的重灾区。

在径向剖面中，由于损伤数值的变化梯度很大，所以远区的损伤数值无法区分。为了便于区分距爆源不同距离处岩体的损伤程度，对径向剖面 6-6 在 15ms 时刻采用 x-y 图的形式来表示损伤的变化梯度。即在图 3(f)中，把 2 表示的方向作为 x 轴，表示距炮孔的距离，在 2 表示的方向上，把在同一水平线上的单元作为一个单元组，这样的单元组共有 21 个。y 轴表示单元组中每个单元的损伤张量的最大主值，这样可得到 21 条曲线，每条曲线分别对应于炮孔不同深度处单元组的损伤值，见图 4。损伤急剧变化的位置至炮孔间的距离减去破坏区长度，就是损伤重灾区的范围。由图可见，在炮孔后部 6m 处，损伤发生急剧变化，变化幅度为约 30%，减去破坏区 2m，可得损伤重灾区的范围为 4m。

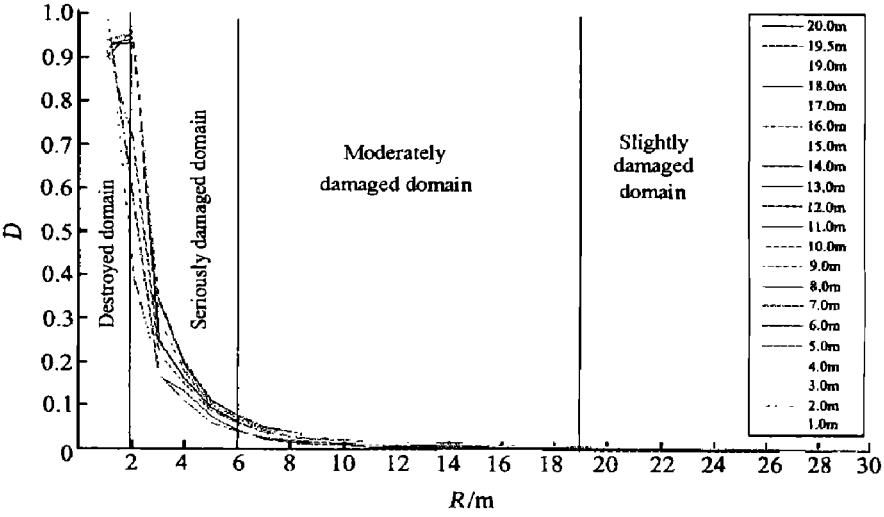

图 4 剖面 6-6 在 15ms 时的损伤梯度

Fig.4 Damage grads from section 6-6

根据 ABAQUS 有限元软件的计算误差，采用与初始损伤张量的最大主值相差 5%作为岩体经历爆破扰动与未经历扰动的分界线，在单孔台阶爆破的情况下，这个范围为 19m(炮孔后部)，即损伤范围为 19m。

在爆源后部 6～19m 的范围内，岩体的损伤比重灾区弱得多，但与 19m 以后岩体的损伤值相比，仍有较大的梯度(见图 4，R 为距爆源的距离，D 为损伤值)，与现场实验相对应，称之为中损区。

在 19m 以后，损伤张量的最大主值与初始损伤张量的最大主值相差小于 5%，认为这部分岩体的力学性质与未受爆炸冲击载荷扰动的岩体的力学性质相同，称之为无损区。

这样，根据剖面 6-6 的损伤等值线图，可以将炮孔后部经历过爆炸冲击作用的岩体按损伤程度的不同分为四个区：破坏区、重灾区、中损区和无损区。

上述不同损伤区域的划分，同样符合爆破破岩理论。炸药爆炸产生冲击波与高温高压的气体，冲击波的压力作用使炮孔附近很小的范围内产生粉碎区(与破坏区相对应)；随着冲击波的衰减，其峰值压力已不足以使岩体产生新的破坏，但冲击波与爆生气体的楔入作用可以使岩体中的固有缺陷进一步发展，使岩体产生损伤(与重灾区和中损区相对应)；随着传播距离的增加，冲击波进一步衰减，其作用已经不能使岩体中的固有缺陷扩展，只能使岩体产生弹性变形，不再对岩体造成损伤(与无损区相对应)。

破坏区部分消耗了大量爆炸能，岩体受到了完全破坏，爆破后随前部破碎的岩体一起塌落，不存在后继的稳定维护问题；在破坏区的后部，由于爆炸能量的衰减很快，已不足以使得岩体产生新的破坏，但可以使岩体中固有的缺陷进一步扩展，所以只能使岩体产生损伤。在损伤的重灾区，岩体已经严重劣化，因此，在分析经历过冲击载荷扰动的岩体的稳定性时，应该重点考虑重灾区范围内的岩体的稳定性。

3.3　模拟结果与现有研究成果的比较

R.Holmberg 等[4] 研究了保留岩体在爆破作用下产生的损伤，认为在爆炸载荷作用下，岩体的损伤程度与岩体的应变密切相关，并且把岩体近似为弹性介质，把弹性波简化为正弦波，于是

$$\varepsilon = v / c \tag{20}$$

式中：ε 为岩体在爆炸载荷作用下的应变，v 是保留岩体中质点的最大震速，c 为波在岩体中的传播速度，对于特定岩体为常数。上式说明，岩体的应变与保留岩体中质点的最大震速密切相关，因而质点的最大震速的变化能够反映岩体的损伤程度。

他们采用经验公式预测保留岩体在爆破作用下质点的最大震速

$$v = \frac{KQ^{\alpha}}{R^{\beta}} \tag{21}$$

式中：v 为质点的最大震速，mm/s；Q 为药量，kg；K、α、β 为与岩石性质相关的常数。这个公式只有在集中装药并且预测点至药包的距离与药包的长度相比很大时才是有效的。为了使这个公式能够用于柱状药包，他们对这个公式进行了修正，把药量 Q 改为线装药密度 q，并把(21)式在整个装药长度上进行积分，从而得到预测点最大震速的预测值。

假设每个药包单元所产生的波到达 A 点的时间相同，由图 5 可以得到药包单元与预测点 A 的距离

$$R_i^2 = R_0^2 + (R_0 \tan\theta - x_i)^2 \tag{22}$$

式中：R_0 为测点 A 到药柱的垂直距离，θ 为药柱底部到测点 A 的仰角，R_i 为药柱单元距测点 A 的距离，x_i 为药柱底部到药柱单元 $\mathrm{d}x$ 的距离。药柱单元的质量

$$W_i = q\,\mathrm{d}x \tag{23}$$

将(21)式在整个装药长度 H 上积分(见图 5)，可得药柱的爆炸作用在测点 A 的最大震速

$$v = Kq^{\alpha}\left[\int_0^H \frac{\mathrm{d}x}{(R_0^2 + (R_0\tan\theta - x)^2)^{\beta/2\alpha}}\right]^{\alpha} \tag{24}$$

他们用(24)式对不同线装药密度下的单孔台阶爆破在保留岩体中距爆源不同距离处的最大震动速度进行了预测，结果见图 6。

对线装药密度为 34kg/m 和 75kg/m 的两次爆破进行了现场测量，并把测量结果绘在图 6 中。预测与实测接近，说明 R. Holmberg 等的模型预测结果有一定的可信度。

图 6 与图 4 对比可以看出，曲线的形状相近。并且在图 6 中，也存在着一个震速突然变化的位置，说明在爆破近区存在一个损伤重灾区。这与本文中用损伤模型模拟的结果是一致的，从另一个角度证明了本文损伤模型的合理性。

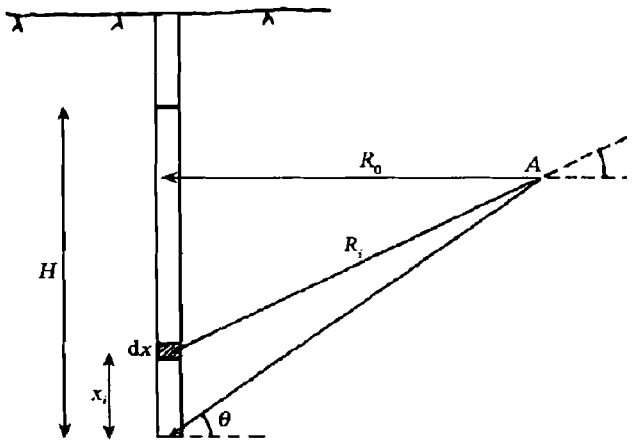

图 5 用在装药长度上的积分预测任意观测点震速的示意图

Fig.5 The schematic figure to predict particle velocity at an arbitrary observation point by integration over charge length

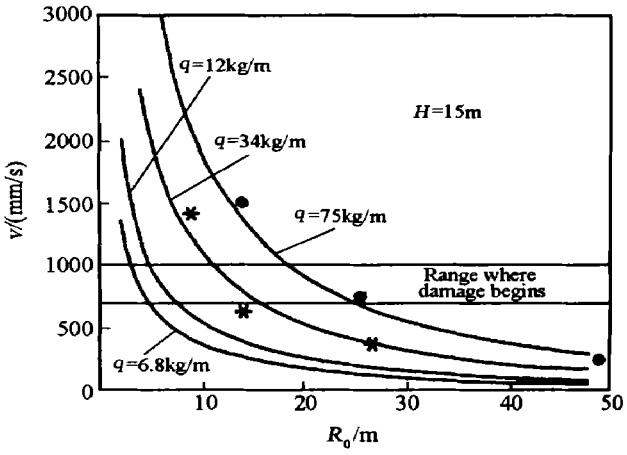

图 6 用 R. Holmberg 等[4] 的模型预测及实测的质点最大震速

Fig.6 Comparing predicted peak vibration velocity using Roger Holmberg's model with measured results

4　结　论

用一个各向异性的损伤模型模拟台阶爆破对后部保留岩体的损伤特征，通过对模拟结果的分析，对冲击载荷下保留岩体的损伤特征有了清楚的认识。单孔台阶爆破对后部保留岩体的损伤呈现明显的分区特征，按损伤程度可以分为四个区：破坏区（爆破后冲带）、重灾区、中损区和无损区。其中损伤重灾区范围内的岩体经历了严重的损伤，在边坡维护中，应予重点考虑。本文的研究对经历过冲击载荷扰动的岩体的稳定分析具有重要意义。

参考文献：

[1] Oriard L L. Influence of blasting on slope stability: State-of-the-art[A]. Brawner C O. Third Int Conf Stability in Surface Mining[C]. Canada, Vancouver, 1981: 43－84.

[2] Holmberg R, Maki K. Case examples of blasting damage and its influence on slope stability[A]. Brawner C O. Third Int Conf Stability in Surface Mining[C]. Canada, Vancouver, 1981: 773－793.

[3] Glass C E. Influence of earthquakes on rock stability[A]. Brawner C O. Third Int Conf Stability in Surface Mining[C]. Canada, Vancouver, 1981: 89－109.

[4] Holmberg R, Persson P. Design of tunnel perimeter blasthole patterns to prevent rock damage[A]. The tunnelling 1979-meeting[C]. UK, London, 1979: 280－283.

[5] Swoboda G, Yang Q. An energy-based model of geomaterials－Ⅱ: Deduction of damage evolution laws[J]. Int J of Solids and Structures, 1999, 36: 1735－1755.

[6] Swoboda G, Yang Q. An energy-based model of geomaterials－Ⅰ: Formulation and numerical results[J]. Int J of Solids and Structures, 1999, 36: 1719－1734.

[7] Yang Q, Zhou W Y, Swoboda G. Micromechanical identification of anisotropic damage[J]. Int J of Fracture, 1999, 98: 55－76.

[8] Perzyna P. Fundamental problems viscoplasticity[J]. Adv Appl Mech, 1966, 9: 244－368.

[9] 刘军. 岩石材料在冲击载荷下的各向异性损伤模型研究[D]. 北京：中国矿业大学北京校区，2001.

[10] Murakami S. Notion of continuum damage mechanics and its application to anisotropic creep damage theory[J]. J Eng Mater Tech, 1983, 105: 99－105.

Numerical simulation of rock remain damage characteristics under single hole bench blast

LIU Jun, WANG Shu-ren, GAO Quan-chen

(*Nanjing University of Science and Technology*, *Nanjing* 210094, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: An anisotropic damage model was established to describe the damage evolution characteristics of rock remain under single hole blast at open pit. The model is in good agreement with the experimental results. It provides the theoretical foundation for the stability analysis of rocks disturbed by impact load in geotechnical engineering application.

Key words: solid mechanics; damage model; anisotropy; blasting impact load; numerical modeling