

文章编号: 1001-1455(2007)02-0136-07

损伤围岩中爆炸应力波动的数值模拟*

鞠 杨¹, 环小丰^{1,2}, 宋振铎¹, 田鹭璐¹, 毛彦喆¹

(1. 中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083;

2. 农业部工程建设服务中心, 北京 100081)

摘要: 应用有限元方法分析了硐室损伤围岩中爆炸应力波的传播和应力分布特征, 通过引入 JHC 本构模型和岩石损伤变量 D 探讨了应力波作用下岩体的损伤演化模式。研究表明: 围岩初始损伤对后续爆炸应力波的波动性质、作用范围和围岩应力分布具有不同程度的影响。当初始损伤超过某临界值后会显著地影响应力波的波动范围和围岩应力分布; 在一定爆炸当量下, 爆炸应力存在一个有效作用范围 L_p , 该范围塑性区以内, 爆炸应力对岩体的损伤随围岩初始损伤增大而增大; 有效作用范围 L_p 以外, 围岩初始残余非弹性变形积累和单元残余拉应力可以平衡爆炸应力波动产生的损伤叠加效应, “耗散”了爆炸应力作用和波动能量。分析了产生在这种现象的原因。给出了有效作用范围 L_p 与围岩初始等效应力 p 之间的经验关系。

关键词: 爆炸力学; 应力波; 有限元; 围岩; 损伤; 爆炸

中图分类号: O382.2

国标学科代码: 130·3520

文献标志码: A

1 引言

如何提高遭受强烈自然灾害和外部打击时地下民用与军事工程的生存能力是世界各国政府和科学技术界普遍关注的问题, 爆炸应力作用下地下工程的安全问题是其中一项重要研究内容。

对爆炸应力波在岩体中的传播及其对结构物的影响有过一系列研究, 在爆炸应力波与能量传递模式、介质材料本构模型以及地下硐室结构动力响应等方面取得了重要进展^[1-9]。然而, 岩体是一种非均匀非连续介质, 这种结构造成了应力波动性质变化多端, 再加上爆炸应力波频谱构成复杂, 影响因素众多, 很难用理论方法精确地描述裂隙岩体的应力波动。另外, 现场和实验室的爆炸模拟试验由于场地、量测设备、人员安全以及花费巨大等原因而受到很大限制。这些不利因素在很大程度上制约了岩体应力波动问题的深入研究和工程应用。可喜的是, 近些年来, 爆炸过程和岩体应力波动的数值模拟研究取得了令人瞩目的成绩, 有限元(FE)、离散元(DEM)和流形元(MM)等数值算法在爆炸过程、岩体节理的应力波动、应力波穿过硐室时防护结构的变形破坏等一系列问题的模拟研究中获得了成功^[10-19]。这些工作为应用数值模拟方法研究岩体爆炸应力波传播与能量释放规律, 解决工程实际问题提供了良好的开端和广阔的应用前景。

在岩体应力波动的数值模拟研究中, 目前模拟通常将地下硐室周围以及应力波动路径周围的岩体简化为无初始损伤的均匀介质, 即忽略爆炸应力波动前岩体中已有的裂隙或弱结构面, 即所谓初始损伤。这种初始损伤可以是地质构造运动的结果, 也可能是人类工程作用的结果。例如, 地下硐室一般是由人工爆破开挖形成, 爆破使硐室围岩由外及内依次形成弹性区、塑性区、裂隙区和粉碎区。硐室开挖一般将粉碎区和裂隙区除去, 但塑性区依然存在, 该区域岩石不可避免地保留了爆破所产生的损伤, 爆破前后岩石的性质和弱结构面分布差别很大。这种差别无疑将影响周围岩体发生二次爆炸时所产生的应力波动与能量传递规律。因此, 数值模拟时不能简单地将硐室围岩假设为无初始损伤的匀质材料。

* 收稿日期: 2005-11-18; 修回日期: 2006-05-15

基金项目: 国家重点基础研究规划项目(2002CB412705); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-05-0215); 北京市重点实验室项目

作者简介: 鞠 杨(1967—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。

本文中考虑地下硐室围岩的初始损伤状态,应用数值方法来分析这种先期损伤对岩体爆炸应力波动和能量传递的影响。应用 ANSYS /LS-DYNA 非线性有限元程序,通过施加与硐室爆破相当的初始等效应力使硐室围岩产生粉碎区、裂隙区和塑性区,模拟洞室开挖除去粉碎区和裂隙区,保留初始等效应力所形成的围岩初始损伤,并在岩石动态 JHC 本构模型中引入初始损伤量,结合损伤力学方法来分析硐室周围岩体发生二次爆炸时的应力波传递过程、岩体损伤演化行为。试图为深入研究有损伤工程岩体的爆炸应力波动和能量传递规律提供参考。

2 计算模型

2.1 硐室模型

考虑一个有防护措施的地下硐室,周围近距离发生爆炸,几何模型和爆炸点分布位置如图 1 所示。岩层模型采用二维平面应变模型,硐室计算半径取 150 cm,爆炸点半径 25 cm,硐室中心到爆炸点中心距离为 450 cm。为了模拟实际岩层的赋存范围,考虑到岩层厚度和宽度足够大时,爆炸在岩层边缘产生的应力和应变非常小,近似于无限边界,因此可以采用有限范围的有位移约束的模型来近似无限岩层介质,取岩层计算范围 3 000 cm×2 000 cm,模型边界设为无反射边界,沿 x 和 y 方向设置位移约束。

图 2 为硐室模型的网格剖分图,单元采用四边形单元,硐室和爆炸点周围区域网格加密。A 点为爆炸点的右边缘,B 点为硐室左边缘,AB 为 x 轴方向,A 为坐标原点。

材料类型分为岩石和爆轰产物两种材料,爆轰产物与岩石之间的相互作用由接触界面传递,选择二维自动面对面接触类型,该模型允许单元之间的接触随单元变形而变化。炸药及岩石变形采用 Lagrange 算法。为了模拟上覆岩层的重力效应,模型周围施加了 10 MPa 的静水压应力。

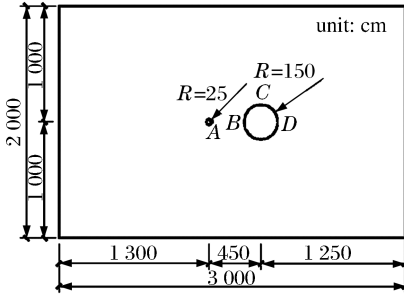


图 1 计算模型尺寸

Fig. 1 Geometrical dimension of calculation model

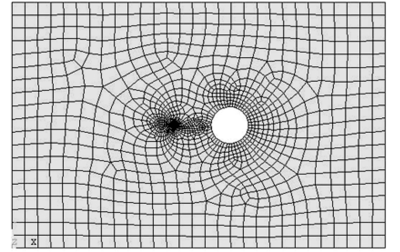


图 2 模型单元和网格剖分

Fig. 2 Element type and meshing of the FE model

2.2 炸药参数

爆炸对围岩产生的压力作用采用爆轰过程的 JWL 状态方程来模拟^[19-20]

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e}{V} \quad (1)$$

式中: p 为爆炸产生的压力, e 为爆轰产物单位体积的内能, V 为单位体积装药产生的爆轰产物的体积; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 为材料常数。为简化计算,将实际的多孔装药等效为单孔装药,装药形状为圆柱形,装药深度为 1.0 m。炸药的主要材料参数分别为:密度 $\rho = 1.5 \text{ g/cm}^3$,爆速 $K = 6.93 \text{ km/s}$, $p_{C1} = 21 \text{ GPa}$, $A = 373.8 \text{ GPa}$, $B = 3.747 \text{ GPa}$, $R_1 = 4.15$, $R_2 = 0.9$, $\omega = 0.35$, $e_0 = 6.0 \text{ GPa}$ 。

2.3 岩石动态本构模型

采用 JHC 本构模型来反映爆炸应力波作用下岩石的动力学响应特性,即高应变、高应变率与高压下的动态力学性能。JHC 模型考虑了材料强度的压力-硬化效应、损伤弱化效应以及应变累积效应,通过引入损伤变量 D 来反映材料的非弹性变形积累对岩石性质的影响,其中非弹性变形包括非弹性体积应变和非弹性剪切应变。JHC 本构模型表达如下^[20-21]

$$\sigma^* = [A(1 - D) + BP^{*N}] (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (2)$$

式中: $\sigma^* = \sigma / f'_c$, $P^* = P / f'_c$, σ 为单元等效应力, P 为单元实际压应力, f'_c 为岩石单轴静抗压强度。损伤变量 $D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1 (P^* + T^*)^{D_2}}$, $0 \leq D \leq 1$, D_1 与 D_2 为实测损伤常数, $T^* = T / f'_c$, T 为最大静水压力,且

$D_1 (P^* + T^*)^{D_2} \geq \epsilon_{f,\min}$, $\epsilon_{f,\min}$ 表示岩石破断时的最小塑性应变, 可以通过实验量测。 $\Delta\epsilon_p$ 和 $\Delta\mu_p$ 分别表示一个积分步长内单元的等效塑性应变增量和体积应变增量, 取值分别按压缩和拉伸两种情况计算。 $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}$ 为实际应变率, $\dot{\epsilon}_0$ 为参考应变率。 A 、 B 和 N 为岩石材料参数, A 为标准化的内聚强度, B 为标准化的压力硬化系数, N 是压力硬化指数, C 是体积应变率系数, 这些参数可以通过岩石实验确定。 计算模型中所采用的部分岩石参数为: 密度 $\rho = 2.45 \text{ g/cm}^3$, 剪切模量 $G = 12.6 \text{ GPa}$, $A = 0.79$, $B = 1.60$, $C = 0.007$, $N = 0.61$, $f'_c = 100 \text{ MPa}$, $T = 10 \text{ MPa}$, $\epsilon_0 = 10^{-6}$, $\epsilon_{f,\min} = 0.01$, 标准化的岩石最大强度 $\sigma_{f,\max} = 7.0$, $\sigma^* < \sigma_{f,\max}$, $P_c = 0.033 \text{ GPa}$, $P_1 = 0.8 \text{ GPa}$, $\mu_c = 0.0013$, $\mu_1 = 0.1$, $D_1 = 0.06$, $D_2 = 1.0$, $K_1 = 85 \text{ GPa}$, $K_2 = -171 \text{ GPa}$, $K_3 = 208 \text{ GPa}$, 单元破坏类型参数 $FS = 1.0$ 。 P_c 、 μ_c 、 P_1 和 μ_1 分别表示岩石单元开裂(损伤起始)和失稳破碎时的压应力和体积应变, 单元压应力 P 和体积应变 μ 按下式计算^[20-21]

$$\begin{cases} P = K_1 \bar{\mu} + K_2 \bar{\mu}^2 + K_3 \bar{\mu}^3 \\ \bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_1}{1 + \mu_1} \end{cases} \quad (3)$$

式中: K_1 、 K_2 和 K_3 为材料参数。 JHC 本构模型中岩石为中等强度岩石, 参数取值方法参见文献[22]。

2.4 围岩的初始损伤

考虑到围岩存在初始损伤, 岩性有所变化, 为了描述这种变化, 同时为简化模型和方便有限元计算, 利用 JHC 模型统一描述围岩性质, 即假设硐室围岩各区域内的材料参数相同, 但不同 x 位置处的损伤量 $D(x)$ 不同, 即围岩岩性变化依赖于损伤大小。 $D = 0$ 为弹性区, $0 < D < 1.0$ 范围为塑性区, $D = 1.0$ 为裂隙区和粉碎区。 为了模拟硐室开挖过程, 围岩裂隙区和粉碎区被挖除了, 爆炸应力波动的模拟计算中仅保留了硐室早期开挖而形成的塑性损伤区。

考虑到 JHC 本构模型中损伤变量 D 反映的是各单元非弹性体积应变积累和非弹性剪切应变积累。 根据损伤力学理论, 可以等效地在硐室内壁施加与爆破作用当量的压力荷载, 使围岩各点的非弹性应变与炸药爆炸产生的围岩非弹性应变相同, 即损伤等效。 保持等效压力荷载作用一段时间后围岩各点处产生不同程度的损伤, 这与爆破施工产生的围岩损伤效果相同。 具体做法是: 首先在硐室内壁施加一定的等效压应力, 持续 10 ms 后卸载; 卸载后再持续 10 ms, 硐室一侧爆炸点开始爆炸。 其目的是: (1) 使围岩产生足够的塑性应变, 即产生足够的损伤; (2) 使围岩损伤充分发育并稳定下来, 这样可以更好地模拟硐室开挖后的时间效应对围岩损伤分布的影响, 更好地反映工程实际情况。

试算了相当于不同爆炸当量的三种等效压应力值来分析围岩的初始损伤。 图 3 给出了等效压应力 100、300 和 500 MPa 下的围岩损伤演变过程中某时刻 t 的损伤分布图。 显然, 等效应力 500 MPa 下围岩损伤范围最大, 100 MPa 下围岩损伤范围最小。 取等效应力 500 MPa 时围岩弹性区边界与 AB 连线的交点 $x = 275 \text{ cm}$ 作为模型爆炸源的位置, 来分析不同初始围岩损伤对爆炸应力波动的影响。

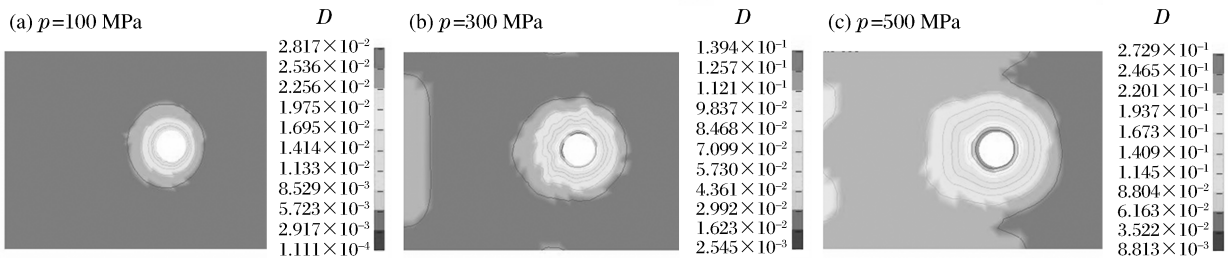


图 3 损伤变量 D 分布

Fig. 3 Distribution of damage in wall rocks

3 结果与分析

为了说明围岩初始损伤对爆炸应力波动和岩体损伤演化规律的影响, 对比模拟了不考虑初始围岩损伤和考虑初始围岩损伤时的爆炸应力的波动过程。 图 4 给出了不考虑初始损伤时 A 点起爆后 0.5、

1.0 和 2.5 ms 时刻围岩的 von Mises 应力分布。图 5 为考虑初始损伤时不同等效应力下起爆 $t=1.0$ ms 时围岩的 von Mises 应力分布。

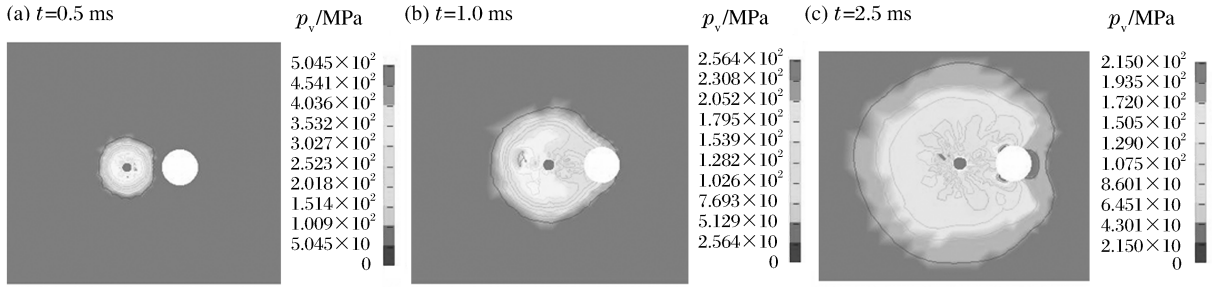


图 4 无初始损伤起爆的围岩 von Mises 应力分布

Fig. 4 Distribution of von Mises stresses of non-damaged wall rocks

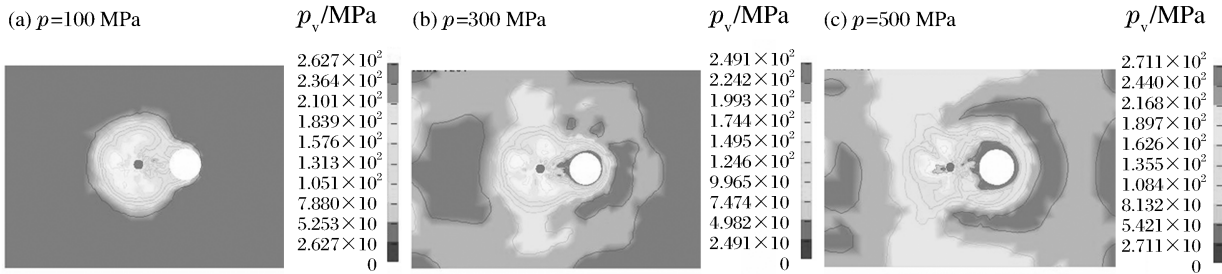


图 5 起爆 1.0 ms 时岩体 von Mises 应力分布

Fig. 5 Distribution of von Mises stresses of damaged rocks 1.0 ms after explosion

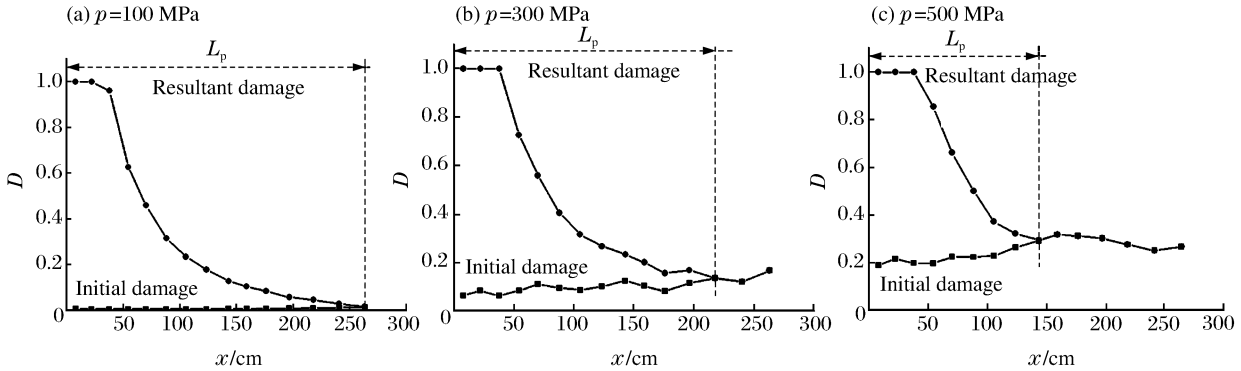


图 6 初始损伤和爆炸后的损伤分布

Fig. 6 Damage distribution of rocks induced by initial equivalent stress and explosion

图 6 为考虑围岩初始损伤时, A 点起爆后沿 AB 连线 (x 轴方向) 上岩体的损伤分布范围。图 7 显示了不同等效应力下围岩初始损伤对 A 点爆炸后 AB 连线上损伤分布的影响规律。图 6 和图 7 中最远端两个 ■ 点之间的距离代表爆炸源最右边缘和硐室最左边缘单元中心之间的距离。

上述计算结果清楚地表明:

(1) 初始等效应力小于 100 MPa 时, 围岩的初始损伤较小, 对 A 点爆炸应力波的波动范围和应力分布影响很小, 几乎与无损伤情况相同 (如图 4 (b)、图 5 (a) 和图 7 所示); 当初始等效应力大于 100

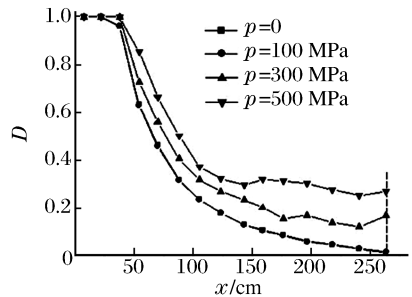


图 7 围岩损伤演化规律

Fig. 7 Damage evolution

MPa 后,围岩初始损伤对爆炸应力波的波动范围和围岩应力分布具有显著的影响,应力波动引起的损伤区范围明显增大,应力波动范围呈不对称分布。

(2)爆炸发生时 A 点邻近区域内围岩的损伤值迅速达到 1.0,岩体进入粉碎状态。随着离爆炸 A 点距离的增大,围岩损伤值迅速减少。不同初始损伤情况下,爆炸源附近围岩的粉碎区和裂隙区范围几乎不变。表明当爆炸当量压力足够大时,该范围取决于爆炸参数,而对硐室围岩(B 点一侧)的初始损伤状态依赖很小。但塑性区内围岩的损伤程度明显地随初始损伤增大而增大,表现为损伤的相互叠加效应。损伤衰减速率随初始损伤增大而降低。

(3)距离爆炸源 A 点一定距离以外或距离硐室边界一定范围以内,围岩的总损伤量几乎不受波动应力的影响,基本保持为围岩的初始损伤大小(如图 6 所示)。表明:在本文爆炸当量条件下,初始损伤区一定范围内(B 点一侧),围岩的初始损伤并未进一步加剧爆炸应力波动引发的岩体损伤变形。换句话说,在该范围内,围岩一定程度的初始非弹性变形积累(指非弹性体积变形和非弹性剪切变形积累)平衡了爆炸应力波动产生的损伤叠加效应,缓解了爆炸应力波对硐室围岩的进一步损伤破坏。该现象十分类似于能量耗散结构(如粘壶)通过塑性变形来消耗能量和降低应力的作用。该结果表明,岩体一定程度的残余非弹性体积变形和剪切变形积累,可以起到降低爆炸应力作用和能量传递的效果。

可认为产生此现象的原因:当硐室 B 点爆破开挖时,围岩由于压应力而形成初始损伤,岩石单元之间产生相对的非弹性体积变形和剪切变形。围岩卸载时,已损伤的单元由于材料性质将恢复弹性变形,在弹性变形恢复过程中,损伤单元由于受到邻近单元的限制作用而对邻近单元产生附加拉应力。损伤单元的初始损伤变形越大,变形恢复过程中对邻近单元产生的附加拉应力也就越大,即单元中存在较大的残余拉应力。当爆炸源 A 点爆炸后,岩体中产生与硐室等效压力方向相反的作用力,爆炸源产生的压应力将首先平衡岩体单元中的残余拉应力,剩余的压应力与单元原有的残余压应力叠加形成新的损伤。由于靠近硐室一侧岩体的初始损伤较大,单元中的残余拉应力较高,需要消耗更多的波动压应力来平衡残余拉应力,因此,后续爆炸压应力叠加产生的损伤很小,基本上保持为原初始损伤大小。

需要指出的是,损伤围岩中爆炸应力波动和能量传播的耗散现象适用于一定的爆炸当量条件,即爆炸源爆炸后,损伤围岩中存在一定范围的塑性区。如果爆炸当量巨大或爆炸源距离硐室过近时,爆炸应力作用下硐室围岩全部进入粉碎区和裂隙区,则不存在上述波动应力与能量“耗散”的现象。

定义 L_p 为 A 点爆炸波动应力的有效作用范围,即 AB 连线上爆炸源右边界(即坐标原点 A 点)到初始损伤曲线与最终损伤曲线交点之间的距离,如图 6 所示。利用上述计算结果可以建立 L_p 与围岩初始等效应力 p 之间的关系。对应初始等效应力 100、300 和 500 MPa 的有效作用范围分别为 262.5、218.7 和 143.7 cm,拟合曲线见图 8。不难看出,两者近似线性关系(数值方程中, p 的单位为 MPa, L_p 的单位为 cm)

$$L_p = 297.4 - 0.297p$$

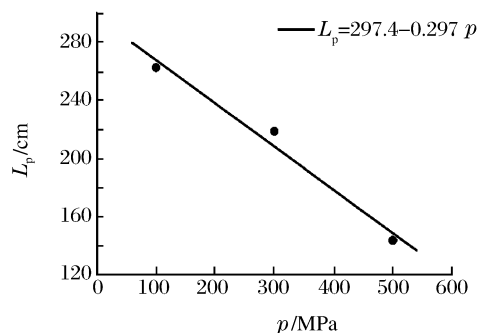


图 8 波动应力有效作用范围与初始等效应力的关系

(4) Fig. 8 Relationship between effective distances of action of wave stresses and initial equivalent stresses

4 结 论

数值计算和分析得到以下结论:

(1)ANSYS/LS-DYNA 可以有效地分析损伤岩体的爆炸应力波传播和应力分布规律。通过引入并输出 JHC 模型中的岩石损伤变量 D ,得到了爆炸应力波作用下岩体的损伤分布和演化规律。

(2)硐室爆破开挖过程会对围岩产生初始损伤,围岩初始损伤对后续爆炸应力波的波动性质、作用范围和围岩应力分布具有不同程度的影响,与围岩初始损伤大小密切相关。只有当初始损伤超过某临界值后,才会显著地影响爆炸应力波的波动范围和围岩应力分布规律。

(3)对有初始损伤的岩体而言,在一定的爆炸当量下,爆炸应力波存在一个有效作用范围 L_p 。在有效作用范围 L_p 的塑性区以内,爆炸应力对岩体的损伤破坏明显地随围岩初始损伤增大而增大,表现为损伤的相互叠加效应。有效作用范围 L_p 以外,围岩初始损伤并未进一步加剧爆炸应力波动引发的岩体损伤。围岩初始残余非弹性变形积累和残余拉应力可以平衡爆炸应力波动产生的损伤叠加效应,起到了一种降低爆炸应力作用和耗散应力波动能量的作用。初步分析了产生这种应力耗散现象的可能原因。

(4)给出了本文模拟条件下爆炸应力波的有效作用范围 L_p 与围岩初始等效应力 p 之间的经验关系。结果表明:两者近似呈线性关系。

参考文献:

- [1] Ricketts T E. Generalized Rayleigh wave propagation in anisotropic rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1974,11(6):251-259.
- [2] Wu Y K, Hao H, Zhou Y X, et al. Propagation characteristics of blast-induced shock waves in a jointed rock mass [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 1998,17(6):407-412.
- [3] 尚嘉兰,沈乐天,赵坚. 粗粒花岗岩闪长岩中应力波的传播衰减规律[J]. 岩石力学与工程学报,2001,20(2):212-215. SHANG Jia-lan, SHEN Le-tian, ZHAO Jian. Attention law of stress wave in the bukit timah granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001,20(2):212-215.
- [4] 杨军,金乾坤. 应力波衰减基础上的岩石爆破损伤模型[J]. 爆炸与冲击,2000,20(3):241-252. YANG Jun, JIN Qian-kun. A new damage model for rock fragmentation by blasting based on stress wave attenuation[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(3):241-252.
- [5] 刘慧. 近距侧爆情况下马蹄形隧道动态响应特点的研究[J]. 爆炸与冲击,2000,20(2):175-181. LIU Hui. Dynamic responses of hoof-shaped tunnels to adjacent blastings[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(2):175-181.
- [6] 陈剑杰. 深埋岩石硐室在爆炸应力波荷载作用下的破坏效应[D]. 上海:同济大学,2001.
- [7] ZHANG Yong-qiang, HAO Hong, LU Yong. Anisotropic dynamic damage and fragmentation of rock materials under explosive loading[J]. International Journal of Engineering Sciences, 2003,41:917-929.
- [8] Stavropoulou M, Exadaktylos G, Papamichos E, et al. Rayleigh wave propagation in intact and damaged geomaterials[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003,40(3):377-387.
- [9] 杨科之,杨秀敏. 坑道内化爆冲击波的传播规律[J]. 爆炸与冲击,2003,23(1):37-40. YANG Ke-zhi, YANG Xiu-min. Shock waves propagation inside tunnels[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23 (1):37-40.
- [10] Lundberg B. Microcomputer simulation of stress wave energy transfer to rock in percussive drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1982,19(5):229-239.
- [11] Nihei K T, Myer L R, Cook N G W. Numerical simulation of elastic wave propagation in granular rock with the boundary integral equation method[J]. Journal of Acoustical Society of America, 1995,97(3):1423-1434.
- [12] Chen S G, Zhao J. A study of UDEC modelling for blast wave propagation in jointed rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998,35(1):93-99.
- [13] 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.
- [14] 杨小林,王树仁. 岩石爆破损伤及数值模拟[J]. 煤炭学报,2000,25(1):19-23. YANG Xiao-lin, WANG Shu-ren. Rock damage by blasting and its numerical simulation[J]. Journal of China Coal Society, 2000,25(1):19-23.
- [15] Thabet A, Haldane D. Three-dimensional numerical simulation of the behavior of standard concrete test specimens when subjected to impact loading[J]. Computers & Structures, 2001,79:21-31.
- [16] 郭易圆. 岩体中爆炸波传播规律的三维离散元数值模拟[D]. 北京:中科院力学所,2001.
- [17] 王礼立. 爆炸力学数值模拟中本构建模问题的讨论[J]. 爆炸与冲击,2003,23(2):97-104. WANG Li-li. On constitutive model ing in numerical simulation of explosion mechanics[J]. Explosion and Shock

Waves, 2003,23(2):97-104.

- [18] Fan S C, Jiao Y Y, Zhao J. On modelling of incident boundary for wave propagation in jointed rock masses using discrete element method[J]. Computers and Geotechnics, 2004,31(1):57-66.
- [19] 鞠杨,夏昌敬,谢和平,等.爆炸荷载作用下巷道混凝土底板破坏的数值分析[J].岩石力学与工程学报,2004,23(21):3664-3668.
- JU Yang, XIA Chang-jing, XIE He-ping, et al. Numerical analysis on rupture of subfloor of coal mine tunnel subjected to blasting loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004,23(21):3664-3668.
- [20] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA Theoretical Manual[Z]. Livermore Software Technology Corporation, 1998.
- [21] Holmquist T, Johnson G, Cook W. A Computational Constitutive Model for Concrete Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Pressures[C]//14th Int Symp Ballistics, 1995:591-600.
- [22] 环小丰.损伤围岩中爆炸应力波传播规律的数值模拟研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2005.

Numerical analyses of blast wave stress propagation and damage evolution in rock masses

JU Yang^{1*}, HUAN Xiao-feng^{1,2}, SONG Zhen-duo¹, TIAN Lu-lu¹, MAO Yan-zhe¹

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining,
China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China;

2. China Agricultural Engineering Consulting Center, Beijing 100081, China)

Abstract: By means of finite element method the blast wave stress propagation and stress distribution in the wall rocks damaged by initial tunneling excavation were numerically analyzed. The damage evolution of rocks subjected to the wave stress was evaluated upon the employment of JHC constitutive model and damage variable D of rock element. It is shown that the influence of initial damage existing in wall rocks on properties of wave stress propagation, affecting domain and distribution depends on the extents of initial damage. The initially existing damage has apparently affected on wave stress propagation and stress distribution as long as its quantity exceeds a threshold value. It turns out that there exists an effective acting span L_p by which the blast wave stress influences on the initially damaged rock as long as a certain volume of explosive remains. Within this domain, the rock damage induced by blast wave stress increases with the increment of initial damage of rocks. Beyond this area scaled by L_p , the accumulated residual inelastic strains and residual tensile stresses in the damaged elements seem to be capable of balancing the compression wave stress resulted from the later explosion, and therefore, prevent the elements from being over damaged. This mechanism seems to dissipate the blast wave stress action and vibration energy. The reason for this phenomenon and mechanism was interpreted. In addition, the relationship between the effective acting span of wave stress and the initial damage in terms of equivalent stress was derived.

Key words: mechanics of explosion; wave stress; finite element method; wall rock; damage; blasting

* Corresponding author: JU Yang
E-mail address: juy@cumtb.edu.cn
Telephone: 86-10-62331253-8012