

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0354-05

考虑损伤效应的岩锚梁光面爆破数值分析

张成良^{1, 2}, 李新平², 代翼飞²

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093; 2. 武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 在地下厂房岩锚梁爆破施工中, 为获得良好的开挖轮廓面和较小的损伤区, 常采用光面爆破的开挖方式, 但在光面爆破施工中, 主爆孔爆破对光爆层岩石造成较大程度的损伤, 使岩石的力学参数发生变化, 而在爆破设计与施工中未考虑这种损伤效应, 结果造成单孔装药量偏大, 岩石受到过度破坏, 出现超挖或产生大量的爆振裂隙。应用动力有限元程序, 建立岩体二维弹塑性模型, 对不考虑损伤和考虑损伤的光面爆破过程进行了数值模拟, 并比较两种模型最大有效应力随距离的变化关系。研究表明, 在相同情况下, 考虑损伤影响时可适当加大光面爆破的炮孔间距和抵抗线。在现场进行了考虑爆破损伤和未考虑爆破损伤的两组爆破试验, 观察爆后效果表明: 考虑爆破损伤效应的参数设计爆破效果好、损伤作用小。

关键词: 光面爆破; 损伤; 数值分析; 爆破参数

中图分类号: TU 94

文献标志码: A

Numerical simulation analysis of rock anchor beam blasting considering damage effect

ZHANG Cheng-liang¹, LI Xin-ping², DAI Yi-fei²

(1. School of Territorial Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Hubei Key Laboratory of Road-Bridge and Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Smooth blasting is generally used to excavate rock anchor beam at the underground power station, its aim is to better quality and smaller crushed region. However, the blasting of the main hole damages the smooth layer to a certain extent to reduce the mechanical parameters of rock mass. The more powder is charged each hole and rock mass is over excavation or generate lots of cracks without considering this effect of damage. The 2D dimension elastic-plastic model of rock mass is adopted and the smooth blasting procedures with and without this damage are simulated in the dynamic finite program. According to the results of comparison of maximum effective stresses of different distance of 2 kinds of models, when the effect of this damage is considered, the interval of holes and the burden can be widened under the same condition. The model considering damage is proved by in-site blasting experiment well.

Key words: smooth blasting; damage; numerical analysis; blasting parameters

1 引言

随着计算机技术的飞速发展和数值计算软件的不断完善, 数值模拟研究方法已成为爆炸力学问题研究中的一种主要手段, 并且在岩石爆破理论和技术研究领域取得了令人瞩目的进展。在爆破损伤数值模拟方面, 有众多学者进行了探索。杨小林等^[1]在分析研究现有岩石爆破损伤模型和岩石损伤断裂理论的基础上, 提出了岩石在爆炸应力波作用下的

损伤断裂准则, 并以 DYNA2D 程序为基本框架, 采用小损伤条件下的解耦方法, 对大理石在填塞和不填塞装药条件下的损伤历程进行了数值模拟。高文学等^[2]基于岩石动态损伤模型, 对沟槽深孔微差爆破进行了数值模拟, 计算结果较好地反映了爆炸荷载作用下岩石的损伤演化规律, 客观地再现了爆破破岩的物理过程。李萍丰、刘欣荣^[3]运用损伤力学研究了爆破区周边岩体的松裂机制, 建立了损伤发展模型, 并对 1m 直径的基坑开挖进行了数值模

拟计算和设计, 模拟结果与实际基本吻合。蔡德所等^[4]以三峡工程基岩开挖爆破为背景, 通过定义损伤变量, 导出其损伤发展方程, 建立模拟基岩爆破损伤范围的本构模型, 并将其嵌入 SHALE 程序中, 实现了基岩开挖爆破损伤范围的数值模拟。钟冬望等^[5]建立了岩石动态损伤模型, 并将其嵌入到 DYNA 程序的用户材料子程序中, 对预裂爆破中不耦合装药条件下的爆破过程进行了数值计算, 并通过试验对数值模拟结果进行了验证和校核, 所得结果与理论分析基本吻合。杨军等^[6]用数值模拟方法对岩石的爆破损伤破坏过程进行了研究, 分析了损伤岩石的爆破作用规律, 为进一步的爆破机制探索和参数优化研究提供了理论依据。但上述研究, 一般考虑的是爆破对岩石的损伤和损伤发展历程, 很少考虑主爆孔先爆对光爆层岩石的影响, 因而有必要在这方面进行深入研究。在低强度岩石中, 由于这种损伤的影响不明显尚能获得较好的光面爆破效果; 然而, 在中低强度岩石中, 却难以获得较好的光面爆破效果。事实上, 在中低强度岩石中光面爆破的效果往往较差, 出现爆破超挖。原因主要是: 主爆孔爆破对光爆层岩石造成较大程度的损伤, 使岩石的力学性质参数发生较大变化, 而光面爆破设计与施工中未考虑这种损伤效应, 结果造成单孔装药量偏大, 岩石受到过度破坏出现超挖现象严重。采用接近实际的数学物理模型^[7], 对材料的动态破坏现象进行数值模拟, 以展示岩石爆破整个作用过程及其效应, 从而有助于深入认识岩石爆破、冲击破坏的机制; 同时数值计算结果的可靠性又可通过试验研究得到验证。

2 计算分析模型

2.1 模型材料屈服条件

由于光面爆破需要减小对炮孔孔壁围岩的破坏, 因此, 采用不耦合装药使作用在炮孔孔壁上的爆炸载荷要比耦合装药时小得多, 故不考虑孔壁附近围岩的流体塑性破坏状态, 试验证明 Mises 屈服条件比 Tresca 屈服条件更接近试验结果^[8, 9]。为了使用方便, 在塑性力学中将 Mises 屈服条件用有效应力形式来表示, 即

$$J_2 = G s_{\eta} e_{\eta} = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \kappa^2 \quad (1)$$

所以 $\sigma_e = \sqrt{3J_2} = \sqrt{3}\kappa$, 当 $\kappa = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_s$ (以拉伸为依据), 则

$$\sigma_e = \sigma_s \quad (2)$$

于是 Mises 屈服条件也可表述为: 当等效应力达到拉伸的屈服极限时, 材料开始进入塑性状态。

2.2 光面爆破损伤参数的选取

通过相似试验, 在试验中通过对岩石试块在爆前和爆后在试样上进行取芯, 然后在试验机上进行单轴压缩试验, 来确定离爆炸点不同距离处的岩石力学参数, 从而确定损伤参数^[10-12], 在考虑主爆孔先爆对光爆层的损伤时, 作如下简化: (1) 损伤前后岩石的密度和泊松比保持不变; (2) 因主爆孔直径为 42 mm, 将光爆层内的损伤简化为按光爆层中间处处理, 且假设损伤程度在光爆层内是均匀不变的, 光爆层受损伤后^[13-15], 岩石弹性模量按减小 19 % 计算、抗压强度按减小 20 %、抗拉强度按减小 76 % 计算。未考虑损伤和损伤时模型材料参数选用溪洛渡水电站左岸地下厂房玄武岩的力学参数见表 1。

表 1 岩石力学参数
Table 1 Rock mechanics parameters

类别	密度 /g · cm ⁻³	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	泊松比	内摩擦角 /(°)	弹性模量 /GPa
未损伤	2.95	80	5.4	0.25	40	25
损伤	2.95	64	4.1	0.25	40	20.2

2.3 有限元模型

溪洛渡水电站是目前世界上在建的最大地下洞室群之一, 在左、右岸分别建有两个地下式厂房。在厂房的开挖中, 岩锚梁开挖难度大、技术要求高, 该部位成型质量的好坏直接影响到今后厂房的安全运行, 因此, 它不仅要求有良好的开挖轮廓面, 而且损伤范围最小。为获得良好的开挖轮廓面, 在厂房非岩锚梁部位进行了相似模拟试验, 厂房岩体为峨眉山玄武岩。岩锚梁开挖初始设计参数为: 岩台光面爆破孔径为 42 mm, 装药为 $\Phi 25$ mm 的乳化炸药。试验设计分两排爆破, 前排为辅助孔, 后排为光爆孔。

2.3.1 模型假设

为进行数值模拟, 做如下假设: (1) 不考虑炮孔倾斜的影响, 将炮孔作为垂直孔考虑; 因炮孔深度远大于炮孔直径, 在垂直炮孔的水平面上, 近似认为炮孔周围的岩石在爆炸荷载作用下处于平面应变状态; (2) 爆炸荷载按三角形分布考虑, 且爆炸压力在炮孔内沿孔壁均匀分布; (3) 岩石材料按弹塑性体考虑, 数值模拟采用的单位制为: cm-g- μ s。

2.3.2 爆炸荷载的处理及炸药参数的选取

在研究岩锚梁岩台的数值计算时, 模型介质选

用溪洛渡左岸地下厂房玄武岩为材料。为简化计算,故假设此岩石为均质、连续、均匀、无初应力和各向同性的双线性随动强化弹塑性体材料。在主爆孔起爆时,为了更全面地模拟岩台参数变化时主爆孔起爆对其周边岩体的动力响应,在模拟中利用了 LS-DANY 中的爆轰过程模拟功能爆轰产物的状态方程反映了压力与体积应变之间的关系,是材料的重要特性之一,计算中采用 JWL 状态方程^[16, 17],该方程是专为描述炸药等含材料爆炸时的压力特性而设定的一种状态方程表达式为

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

式中: A , B , R_1 , R_2 , ω 均为材料常数; P 为压力; V 为相对体积; E_0 为初始比内能。乳化炸药具体参数见表 2。

表 2 乳化炸药 JWL 方程参数

Table 2 JWL equation parameters of emulsified explosive

$\rho / \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	$D / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω	E_0 / GPa
1 310	5 500	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

2.3.3 模型建立

模型的建立和网格划分步骤如下: (1) 在 X - Y 平面内建立一 $600 \text{ cm} \times 600 \text{ cm}$ 的矩形, 在 X - Y 坐标 (250, 420), (350, 420) 处各挖去一个 $R = 2.1 \text{ cm}$ 的圆孔; (2) 平面网格划分, 在 $Y = 0$, $X = 0$, $X = 600 \text{ cm}$ 3 条直线上的矩形边按最大划分 20 cm 控制, $Y = 600 \text{ cm}$ 直线上的边按最大划分 10 cm 控制, 挖孔洞外按最大划分 1 cm 控制, 以取得计算的精确和效率。模型经网格剖分后的单元总数为 4 130 个单元。考虑损伤和未损伤模型见图 1 所示。(3) 在

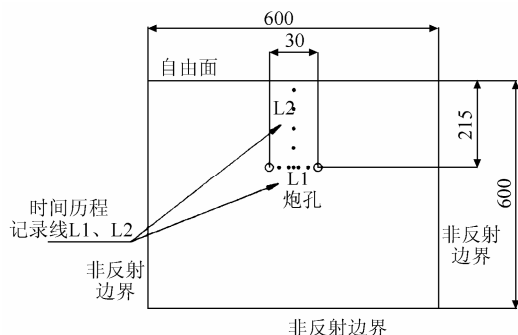


图 1 有限元数值分析模型 (单位: cm)

Fig.1 Numerical analysis model about finite element (unit: cm)

模型平面上设置两记录线, L1 记录线上在炮孔连心线上每隔 5 cm 取一个单元, L2 记录线上从炮孔连心线中点向自由面方向每隔 40 cm 取一个单元 (L1 记录线上取 4 个单元, L2 记录线上取 5 个单元) 作为时间历程记录单元, 用以记录该单元有效应力场的变化历程。

3 数值模拟及结果分析

爆炸荷载作用下介质所受的应力状态是非常复杂的, 用 VON Mises 有效应力来表征介质的应力特征是一个重要手段。从数值模拟的结果可以看出, 炮孔连心线上靠近孔壁附近的有效应力先达到最大值, 且大于岩石动态抗拉强度 (4.1 MPa), 说明裂纹先在孔壁附近开裂, 然后逐渐向中心延伸, 最后形成贯通裂缝。图 2 和图 3 是不考虑损伤和考虑损伤时 L1 和 L2 记录线上最大有效应力随距离的变化曲线。从图中可以看出, 考虑损伤时各记录单元的

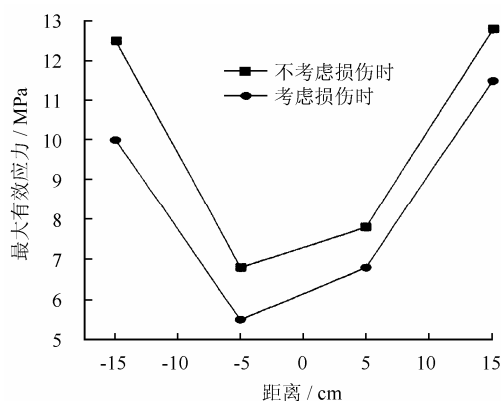


图 2 L1 记录线上最大有效应力随距离变化曲线

Fig.2 The change curve about maximum effective stress with distance in L1 order line

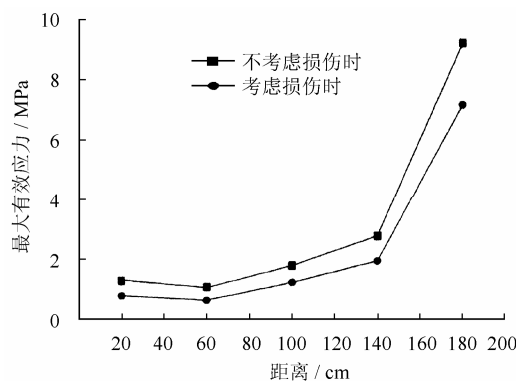


图 3 L2 记录线上最大有效应力随距离变化曲线

Fig.3 The change curve about maximum effective stress with distance in L2 order line

有效应力普遍比不考虑损伤时的有效应力低, 这是由于受损岩体中的裂隙对应力波的弱化造成的。在受损岩体内有效应力降低的同时, 岩体的破坏强度也应随着降低。因此, 考虑损伤作用后, 光面爆破参数抵抗线和孔距可以适当加大。为获得良好的光爆效果, 需充分考虑主爆孔对光爆层的损伤弱化作用, 在布置炮孔时, 光爆层的间距可以加大为不考虑损伤效应的炮孔间距的 (1.1~1.2) 倍左右; 抵抗线为 (1.1~1.2) 倍左右。

4 岩锚梁相似爆破试验及效果分析

4.1 岩锚梁爆破相似模拟试验

左岸地下厂房布置于坝线上游库区, 厂房纵轴线方位为 N24°W, 地下厂区分别由主机间、安装间、副厂房、主变室、9 条压力管道、9 条母线洞、9 条尾水管及尾水连接洞、尾调室、3 条尾水洞、2 条出线井以及通排风系统、防渗排水系统等组成, 构成以三大洞室为主体、纵横交错、上下分层的大规模的地下洞室群。主厂房、主变室、尾水调压室三大洞室平行布置, 厂房尺寸为 320.1 m×31.9 m×75.1 m (长×宽×高), 从上到下分 11 层开挖。岩性主要为致密状玄武岩、含斑玄武岩。厂房第 III 层是岩壁梁所在的部位, 岩台开挖的层高为 8.0 m, 岩台厚度为 1.75 m。为找到开挖岩锚梁的最优爆破参数, 需进行相似模拟试验, 在副厂房 (厂横) 0+316~0+326 段上游侧非保护层部位, 结合第 II 层和第 III 层上层开挖实施, 模拟岩台试验和实际岩台完全一样, 结合数值模拟和工程类比, 同时为验证数值模拟的结果, 岩台分两个试验段进行, 每个试验段长度分别为 5 m, 试验段的设计参数分别如下: (1) 考虑爆破损伤效应的参数设计: 孔径为 $\Phi 42$ mm, 垂直孔间距为 35 cm, 最小抵抗线为 70 cm, 孔深为 215 cm, 线装药密度为 80 g/m; 斜孔炮孔间距为 35 cm, 最小抵抗线为 70~90 cm, 孔深为 316 cm, 线装药密度为 90 g/m; 辅助孔间距为 70 cm, 最小抵抗线为 105 cm, 孔深为 220 m, 单耗为 0.25~0.35 kg/m³。(2) 未考虑爆破损伤效应的参数设计: 孔径为 $\Phi 42$ mm, 垂直孔间距为 30 cm, 最小抵抗线为 60 cm, 孔深为 215 cm, 垂直孔的线装药密度为 80 g/m, 斜孔炮孔间距为 30 cm, 最小抵抗线为 60~100 cm, 孔深为 316 cm, 线装药密度为 90 g/m; 辅助孔间距为 60 cm, 最小抵抗线为 115 cm, 孔深为 220 m, 单耗为 0.25~0.35 kg/m³。岩台开挖示意图见图 4。

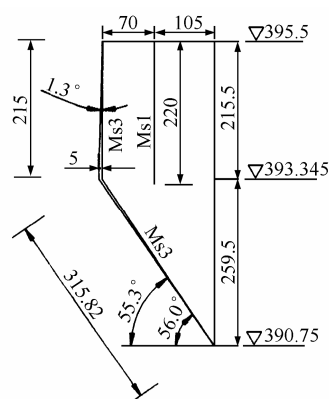


图 4 岩台开挖示意图 (单位: cm)

Fig.4 Sketch of rock bench excavation(unit: cm)

4.2 效果分析

按照现场的装药结构和起爆网络, 试验按设计的要求起爆, 通过爆后效果观察图 5 和图 6, 结果如下:

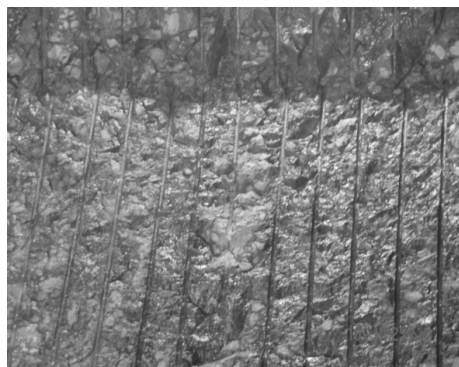


图 5 考虑损伤效应的爆破效果图

Fig.5 Blasting effect considering damage effect



图 6 不考虑损伤的爆破效果图

Fig.6 Blasting effect without considering damage effect

4.2.1 测量成果分析

岩台开挖测量断面按 1 m 间距测 1 条, 共检测到 127 个点, 其中考虑损伤检测 60 个点, 未考虑损伤检测 67 个点。通过测量资料分析, 考虑损伤效应

的岩台开挖最大超挖 7.1 cm, 岩台平均超挖 3.9 cm; 未考虑损伤效应开挖最大超挖 12.2 cm, 岩台平均超挖 4.8 cm。

4.2.2 爆破效果分析

(1) 考虑损伤效应的爆破效果好, 垂直孔和斜孔相邻两孔间的岩面平整, 炮孔痕迹在开挖轮廓面上均匀分布, 孔壁没有明显的爆振裂隙; 炮孔痕迹在开挖轮廓面上分布较均匀, 总体平整度较好, 残孔率在 90 % 以上。

(2) 未考虑损伤的爆破效果稍差, 垂直孔和斜孔相邻两孔间的岩面平整度稍差, 炮孔痕迹在开挖轮廓面上均匀分布, 孔壁有少量明显的爆振裂隙; 炮孔痕迹在开挖轮廓面上分布较均匀, 总体平整度较好, 残孔率在 85 % 以上。

(3) 岩台爆破开挖模拟试验声波测试结果表明: 考虑损伤区的松动圈为 0.2~0.4 m, 未考虑损伤区的松动圈范围为 0.3~0.6 m。

5 结 语

将实际问题简化为平面应变问题, 岩石按弹塑性体考虑, 爆炸荷载简化为三角形分布, 借助 ANSYS/LS-DYNA 程序, 对考虑损伤和不考虑损伤光面爆破进行数值模拟。模拟结果表明: 考虑损伤时, 在孔壁的爆炸荷载不变的条件下, 光面爆破的孔距和抵抗线可适当增大。根据数值模拟结果, 加大了光面爆破的间距和抵抗线, 现场进行了考虑损伤和未考虑损伤的两种爆破试验, 爆后效果观察和声波测试结果表明, 考虑损伤的光面爆破效果较好。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 高文学, 刘运通. 岩石动态损伤的数值模拟[J]. 北京工业大学学报, 2000, 26 (2): 5—11.
- [3] 李萍丰, 刘欣荣. 岩石动态损伤的数值模拟[J]. 矿业安全与环保, 2000, 27 (2): 45—47.
- [4] 蔡德所, 张继春. 基岩爆破损伤的数值模拟及其工程应用[J]. 水利学报, 1997 (4): 66—70.
- [5] 钟冬望, 李寿贵. 预裂爆破数值模拟及其应用研究[J]. 爆破, 2001, 18 (3): 8—11.
- [6] 杨军, 金乾坤, 黄凤雷. 岩石爆破理论模型及数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [7] 张志呈. 爆破基础理论与设计施工技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1994.
- [8] 蔡福广. 光面爆破新技术[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1994.
- [9] 张志呈. 定向断裂控制爆破[M]. 重庆: 重庆出版社, 2000.
- [10] 杨军, 金乾坤, 黄凤雷. 岩石爆破理论模型及数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [11] 杨义光. 微损伤光面爆破技术在洪家渡工程的应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2001.
- [12] 余天庆, 钱济成. 损伤理论及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.
- [13] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002. 171—178.
- [14] 杨小林, 员小有, 吴忠, 等. 爆破损伤岩石力学特性的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 436—439.
- [15] 杨军, 陈鹏万. 现代爆破技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.
- [16] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [17] 杨军, 陈鹏万, 胡刚. 现代爆破技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004.