

文章编号: 1000-7598-(2006)增刊-0179-04

洞室开挖卸荷作用下岩体裂纹动态 应力强度因子分析

吴 亮, 朱红兵, 王秀娟

(武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 在线弹性变形假设的情况下, 以龙滩水电站地下厂房开挖为例和以 ANSYS 数值计算软件为平台, 计算了在爆破荷载和初始地应力卸荷载作用下岩体裂纹的动态应力强度因子。计算表明, 在中高地应力地区的爆破破岩过程中, 虽然炮孔附近的裂纹扩展和岩体损伤主要由爆破荷载引起的, 但岩体初始地应力的动态卸荷可能是引起保留岩体中远区松动及原有裂纹扩展的重要因素之一。

关 键 词: 岩石力学; 爆破荷载; 初始应力; 动态因子

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Analysis of dynamic stress intensity factor of rock mass under excavation unloading in underground caverns

WU Liang, ZHU Hong-bing, WANG Xiu-juan

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Based on linear elastic assumption and ANSYS software, taking the excavation of underground powerhouse of Longtan Project for example, the dynamic stress intensity factor under blasting load and unloading of initial stress is calculated. The results show that the crack propagation and rock mass damage near borehole are due to blasting load in the process of fragmentizing rock by blasting in medium high ground stress region. But the dynamic unloading of initial stress is the key factor which induces the loose of reserved rock in medium long region and the propagation of original crack.

Key words: rock mechanics; blasting loading; initial stress; dynamic factor

1 引 言

开挖爆破对边坡和地下洞室的影响包括两个方面: 开挖卸荷引起的岩体松弛和爆破荷载(包括爆源近区的爆破冲击波作用和中远区的爆破振动作用)引起的动力损伤。一般认为, 开挖引起的卸荷松弛(应力重分配)过程持续时间较长、涉及的范围较大, 主要取决于岩性和岩体的结构特性; 而爆破荷载作用下的动力损伤过程为一瞬态过程, 其持续时间短、作用范围对完整岩体一般仅限于表层。由于涉及的岩体对象及力学过程的复杂性, 以往对上述两方面的作用通常分开考虑, 如文[1]对爆破引起的岩体损伤问题进行了探讨, 文[2~5]对开挖卸荷引起的岩体的变形、强度、破坏等问题进行了研究。

以往国外学者对岩体开挖卸荷松弛效应的研究, 主要是针对准静态过程的研究。由于爆破开挖过程中岩体被破碎至抛掷的完成时间约为数毫秒至几百毫秒量级, 因此岩体原始应力场的开挖卸荷是一动态过程, 这种动态卸荷效应在高地应力状态下隧洞全断面钻爆掘进和在高山峻岭中的河谷坝肩开挖中尤为明显。岩体爆破开挖过程初始应力场的动态卸荷可能是引起岩体松动的重要因素之一^[6, 7]。

裂纹在高应变率动态扩展的问题一直是动态断裂力学的研究热点。近年来, 研究者在高应变率裂纹断裂行为的研究中提出了多种测试技术, 如动光弹、动云纹、全息干涉及超动态应变电测等方法。但具体到爆炸载荷下的高应变率的材料裂纹断裂的研究, 由于其裂纹尖端的应变梯度大, 广泛应用于

收稿日期: 2006-04-04

作者简介: 吴亮, 男, 1980 年生, 博士研究生, 主要从事水利水电工程施工技术、工程爆破等方面的研究。E-mail: liangwu1980@yahoo.com.cn

动力学的试验研究方法对确定应力应变奇异场的特性参量结果影响很大。近来在材料动态断裂韧度测试中, 试验-数值法得到较多应用^[8, 9], 其原理是利用作用在试样上的冲击载荷, 借助于数值方法, 如有限元法, 进行完全的动态分析, 计算出试样裂尖的动态应力强度因子。

本文在线弹性变形假设的情况下, 以龙滩水电站地下厂房开挖为例, 以 ANSYS 数值计算软件为平台, 计算在爆破荷载和初始地应力卸荷载作用下岩体裂纹的动态应力强度因子的, 提高对地下洞室岩体裂纹扩展的影响因素地认识。

2 开挖岩体初始应力场与爆破荷载的确定

2.1 初始应力场的确定^[7]

龙滩水电站地下厂房以砂岩、粉砂岩为主。其开挖尺寸(长×宽×高)为 388.5 m×28.9 m×55.7 m, 共分 3 层开挖。两侧导洞超前开挖, 两侧导洞支护结束后, 中间岩柱(宽 14.7 m)梯段爆破, 开挖边线 and 中间拉槽均预裂。图 1 为龙滩水电站地下厂房前 3 层的分层分块示意图(1, 2, 3, ...分块编号, I, II, III 为分层编号), 图中分块的标号为开挖的顺序。第 III 层开挖时, 首先在轮廓面 A_1-A_2 , B_1-B_2 上进行预裂, 再进行中间拉槽(7)再进行扩挖(8)。

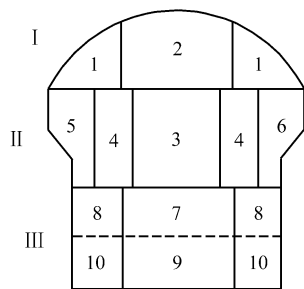


图 1 地下厂房分层分块及开挖顺序示意图

Fig.1 Schematic diagram for the excavation process of underground powerhouse

现以第 3 层预裂爆破时水平应力动态卸荷为例进行分析计算。首先求出未开挖时岩体内的初始地应力分布, 然后利用 ANSYS 软件的单元生死功能, 模拟出第二层开挖完毕之后地下厂房区岩体的应力分布, 得到第三层预裂面上预裂前的应力, 作为动态卸荷的初始应力。

计算中竖直向应力基本上等于岩体的自重应力, 水平应力(包括构造残余应力在内)与竖直应力的比值取为 2.3, 地下厂房拱顶距离地面的平均

厚度为 180 m, 该应力场属于一个中等略偏高的地应力区。

在岩体开挖模拟中, 岩体采用双线性弹塑性模型, 其力学参数^[10]为: 密度 $\rho = 27 \text{ kN/m}^3$, 弹性模量 $E = 80 \text{ GPa}$, $E_t = 8.0 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.2$, 屈服应力为 100 MPa。

利用 ANSYS 程序中的单元生死功能, 第 6 步开挖完成后, 地下洞室围岩中的水平侧向应力分布如图 2 所示。

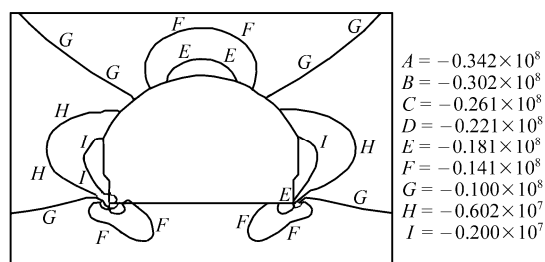


图 2 第 6 步开挖后岩体水平侧向应力(单位: Pa)

Fig.2 Horizontal stress distribution after the sixth excavation step(unit: Pa)

根据计算结果可知, 预裂前第 3 层轮廓面节点水平侧向应力相差不大, 其平均应力为 14.5 MPa, 为压应力。预裂爆破作用后, 沿轮廓面形成新的自由面, 其上的应力为零。由于爆破作用过程一般为几十到几百毫秒, 根据文[11], 考虑计算时间, 假定卸荷时间为 10ms。卸荷过程如图 3 所示。

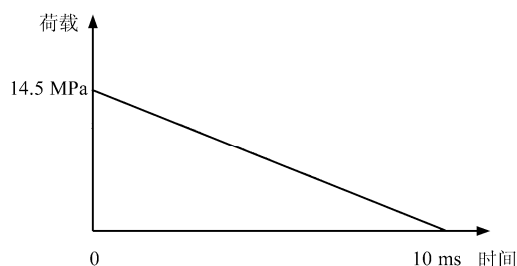


图 3 初始应力卸荷

Fig.3 Initial stress unloading

2.2 爆破荷载的确定

爆轰产物的平均爆轰压力 P_D 为

$$P_D = \frac{1}{8} \rho_0 D^2 \quad (1)$$

式中 P_D 为爆轰产物的平均爆轰压力(MPa); ρ_0 为炸药重度(kN/m^3); D 为炸药爆速(m/s)。

爆轰产物在空气间隙中按两段式的状态方程绝

热膨胀:

$$P_D V_D^\gamma = P V^\gamma \quad (2)$$

当 $P \geq P_k$ 时, 取 $\gamma = 3.0$, 即为凝聚体炸药状态方程; 当 $P < P_k$ 时, 取 $\gamma = 1.4$, 即为理想气体的等熵方程。

式 (2) 中, P_D 、 V_D 和 P 、 V 分别为初始状态和终了状态的压强和体积; P_k 为爆轰产物的临界压力, 这里取 $P_k = 100$ MPa; γ 为爆轰产物的绝热指数, 由式 (2) 可计算得到爆轰产物膨胀到孔壁时作用在孔壁的爆炸峰压 P_0 。对于轴向间隔装药结构, 可先等效视之为连续装药结构, 根据药量相等原理计算等效连续装药直径, 然后利用式 (2) 计算孔壁爆炸峰压。在对边墙进行预裂时, 炮孔采用不耦合装药^[7]: 炮孔直径为 90 mm, 装药直径为 32 mm, 采用径向不耦合装药, 炸药重度 $\rho_0 = 10$ kN/m³, 爆速 $D = 4\,000$ m/s。计算出预裂炮孔内孔壁的峰值压力为 22.4 MPa, 为简化计算, 一般采用三角形荷载, 升压时间取为 100 μ s, 总的作用时间取为 600 μ s, 其作用过程如图 4 所示。

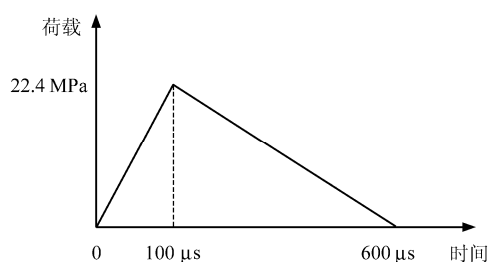


图 4 爆破荷载
Fig.4 Blasting load

3 计算模型

计算模型局部网格如图 5 所示。AB、BC、CD 为无反射边界, AE 为对称边界, DE 为荷载边界, 荷载边界长 2.5 m, 裂纹平行荷载边界, 长 1 m, 距离荷载边界 5 m, 积分步长 0.2 μ s。

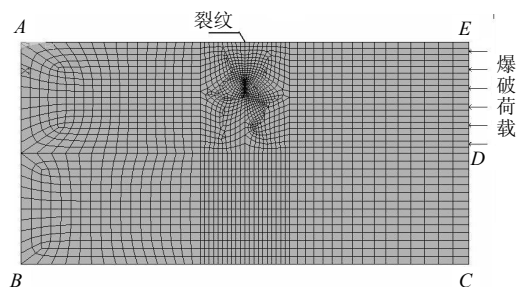


图 5 计算模型网格
Fig.5 Mesh of the calculating model

为模拟裂纹尖端应力应变场的奇异性, 裂尖周围采用了 1/4 节点单元。由于动态载荷作用下稳定裂纹的裂尖应力、位移场与静态情况完全类似^[12], 因此, 在平面应变情况下位移法计算应力强度因子 $K_I(t)$ 的公式为

$$K_I(t) = \frac{\sqrt{2\pi E V(t)}}{4(1-\nu^2)\sqrt{r}} \quad (3)$$

式中 E 、 ν 分别为弹性模量和泊松比; $V(t)$ 为裂纹面上各点垂直于裂纹面的位移; $V(t)$ 由动态有限元法得到, 外推到裂纹的尖端 $r = 0$ 处即可以得到应力强度因子。

4 计算结果分析

图 6、图 7 分别为爆破荷载和初始地应力卸荷作用下 $K_I(t)$ 裂纹动态应力强度因子的变化曲线。

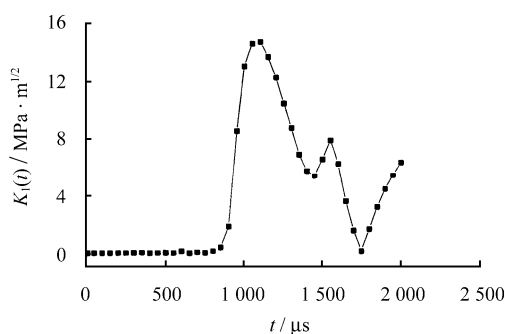


图 6 爆破荷载作用下裂纹 $K_I(t)$ 动态应力强度因子的变化曲线
Fig.6 Dynamic stress intensity factor ($K_I(t)$) curves of crack-tip under blasting loading

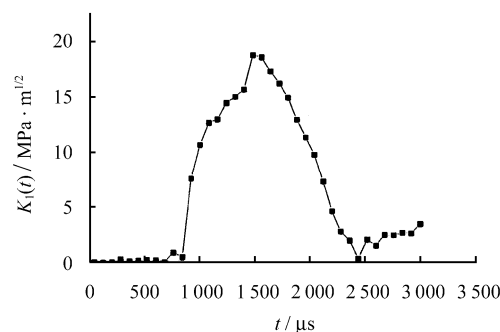


图 7 地应力卸荷作用下裂纹 $K_I(t)$ 动态应力强度因子的变化曲线
Fig.7 Dynamic stress intensity factor ($K_I(t)$) curves of crack-tip under initial stress unloading

由图 6、图 7 可知, 虽然爆破荷载峰值比初始地应力荷载峰值大, 但其作用时间短, 频率高, 衰减较快, 在距离荷载作用边界 5 m 处, 初始地应力卸荷作用下 $K_I(t)$ 裂纹动态应力强度因子的峰值要

比爆破荷载作用下的峰值大, 峰值持续时间也要比爆破荷载作用下的峰值持续时间长。

可见在近区岩体初始裂纹的扩展, 主要是爆破荷载引起的, 但在中远区裂纹的扩展是由初始地应力动态卸荷引起的。

5 结 语

通过 ANSYS 数值计算软件, 分析了在爆破荷载和初始地应力动态卸荷荷载作用下岩体裂纹动态因子, 得出以下结论:

(1) 在中高地应力地区的爆破破岩过程中, 虽然炮孔附近的裂纹扩展和岩体损伤主要由爆破荷载引起的, 但岩体初始地应力的动态卸荷可能是引起保留岩体中远区松动及原有裂纹扩展的重要因素之一。

(2) 岩体初始地应力动态卸荷效应与爆破荷载效应的进一步研究, 对于地下洞室与岩石高边坡开挖中爆破松动区的确定、围岩稳定性分析、理解岩爆的产生等都有重要的意义。

(3) 由于爆破破岩及地应力的动态卸荷是一个复杂的过程, 本文只是对这两种荷载作用下岩体原有裂纹的动态因子进行了初步地探讨, 对于初始地应力卸荷及爆破荷载耦合作用下岩体裂纹的扩展, 应力调整还有待进一步分析。

参 考 文 献

- [1] 张继春, 刘浩吾. 岩体爆破松裂区得损伤机制及数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(3): 250—257.
ZHANG Ji-chun, LIU Hao-wu Damage mechanism and numerical simulation of the microcrack zone resulting from rock blasting[J]. **Explosion and Shock Waves**, 1996, 16(3): 250—257.
- [2] 哈秋龄. 岩石边坡工程与卸载非线性岩石(体)力学[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(4): 386—391.
HA Qiu-ling. Rock slope engineering and unload in nonlinear rock mass mechanics[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1997, 16(4): 386—391.
- [3] 吴刚, 孙钧. 卸载应力状态下裂隙岩体的变形和强度特性[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(6): 615—621.
WU Gang, SUN Jun. Deformation and structure characters of joints rock mass under unloading stress states[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(6): 615—621.
- [4] 白明洲, 黄润秋, 王士天, 等. 开挖卸载条件下高边坡岩体变形和破坏的数值计算[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2000, 11(2): 34—38.
BAI Ming-zhou, HUANG Run-qiu, WANG Shi-tian, et al. Study on high side wall deformation stability of a large-spaned underground powerhouse[J]. **The Chinese Journal of Geological Hazard and Control**, 2000, 11(2): 34—38.
- [5] Sayers C M. Orientation of microcracks formed in rocks during strain relaxation[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1990, 27(5): 437—439.
- [6] 卢文波, 金李, 陈明, 等. 节理岩体爆破开挖过程的动态卸载松动机理研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊.1): 4 653—4 657.
LU Wen-bo, JIN Li, CHEN Ming, et al. Study on the mechanism of the loosening of the jointed rock mass caused by the dynamic unloading of initial stress during rock blasting[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.1): 4 653—4 657.
- [7] 易长平, 卢文波, 许红涛, 等. 岩体开挖过程中初始应力的动态卸荷效应的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增刊.1): 4 750—4 754.
YI Chang-ping, LU Wen-bo, XU Hong-tao, et al. Study on effects of dynamic unloading on initial stress during rock excavation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2005, 24(Supp.1): 4 750—4 754.
- [8] Yokoyama T, Kishida K. A novel impact three-point bend test method for determine the dynamic fracture—initiation toughness[J]. **Experimental Mechanics**, 1989, 29: 188—194.
- [9] Weisbrod G, Rittel D. A method for dynamic fracture toughness determination using short beams[J]. **International Journal of Fracture**, 2000, 104: 89—103.
- [10] 龚光伟. 龙滩水电站地下厂房区岩体应力场的试验研究[J]. 红水河, 1994, 13(3): 11—18.
- [11] 戴俊. 岩石动力学特征与爆破理论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2002.
- [12] 范天佑. 断裂动力学引论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.