

文章编号: 1000-7598 (2011) 05-1531-07

深埋隧洞爆破开挖扰动损伤效应的数值模拟

陈 明^{1,2}, 胡英国^{1,2}, 卢文波^{1,2}, 严 鹏^{1,2}, 周创兵^{1,2}

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 武汉大学 水工岩石力学教育部重点实验室, 武汉 430072)

摘 要: 爆破开挖扰动是深埋隧洞损伤区孕育及演化的重要影响因素。根据隧洞岩体钻爆开挖过程分析了爆炸荷载及开挖荷载瞬态卸荷对岩体的扰动作用, 基于 LS-DYNA 动力有限元程序, 提出了利用施加节点反力模拟待开挖隧洞岩体的约束作用, 通过控制节点反力的变化过程以模拟开挖荷载瞬态卸荷, 采用爆炸荷载变化曲线模拟爆炸作用过程的爆破开挖扰动数值模拟方法, 并利用该方法模拟分析了爆破开挖扰动对围岩的损伤效应, 结果表明, 应力重分布对围岩损伤最大, 隧洞围岩损伤区主要由围岩初始应力重分布所导致, 爆炸荷载作用将增大围岩损伤区范围, 考虑开挖荷载瞬态卸荷作用的围岩损伤区最大, 且地应力越高, 开挖荷载瞬态卸荷作用对围岩的损伤效应越显著。

关 键 词: 隧洞; 爆破; 损伤; 瞬态卸荷; 数值模拟

中图分类号: O 383.1; TV 554

文献标识码: A

Numerical simulation of blasting excavation induced damage to deep tunnel

CHEN Ming^{1,2}, HU Ying-guo^{1,2}, LU Wen-bo^{1,2}, YAN Peng^{1,2}, ZHOU Chuang-bing^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering of Ministry of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Blasting excavation disturbance is an important influence factor to the inoculation and evolution of deep tunnel damaged zone. According to the drilling and blasting excavation process of the tunnel, the disturbance effects induced by blast load and transient unloading of excavation load are analyzed; and based on the LS-DYNA dynamic finite element program, the numerical simulation method of blasting excavation disturbance is proposed that using nodes reaction to simulate the constraint of the awaiting excavation tunnel rock, controlling the change process of nodes reaction to simulate transient unloading of excavation load, and using blasting loading change curve to simulate the effect of explosion. After that, the blasting excavation induced damage of tunnel rock mass is analyzed by the method. The results show that the surrounding rock damage zone is mainly caused by the in-situ stress redistribution and increased by blasting load; the surrounding rock damage zone is maximum when the transient unloading of excavation load is taken into account; and in-situ stress is higher, the damage caused by transient unloading of excavation load is more remarkable.

Key words: tunnel; blasting; damage; transient unloading; numerical simulation

1 引 言

正在兴建或待建的锦屏一级与二级水电站、南水北调西线等一大批大型或特大型水电工程都处在我国西南、西北地区的崇山峻岭中, 均需进行高地应力条件下大跨度地下洞室群或超长深埋隧洞的大规模、高强度岩石开挖, 爆破是当前国内外地下工程岩体开挖的主要手段。

爆破开挖扰动对深埋隧洞围岩的影响, 主要体

现在因开挖而导致的围岩应力重分布、开挖爆破的爆炸荷载以及开挖荷载瞬态卸荷对岩体的损伤破坏。围岩应力重分布是隧洞围岩损伤的主要原因^[1-6], Cai 等^[6]提出了地下洞室开挖完成后脆性岩体裂纹起裂和裂纹损伤的应力门槛值, 根据隧洞开挖后围岩的应力重分布判断开挖损伤区的大小。爆炸荷载对岩体的损伤方面, 李宁等^[7]研究了岩石在爆破振动下的动力损伤特性, 杨小林等^[8]研究了爆生气体作用下的岩石裂纹扩展和损伤问题, Ma^[9]和 Zhu^[10]

收稿日期: 2011-02-09

基金项目: 国家 973 计划项目 (No. 2010CB732003); 国家自然科学基金项目 (No. 50909077, No. 50725931, No. 51097111)。

第一作者简介: 陈明, 男, 1977 年生, 博士, 副教授, 主要从事岩石动力学与工程爆破方向的研究。E-mail: whuchm@yahoo.com.cn

采用数值模拟的方法,研究了爆炸荷载作用下岩体的损伤及裂纹扩展过程,肖明等^[11]研究了地下洞室开挖爆破下围岩松动圈的数值分析方法。以往研究中,开挖荷载瞬态卸荷对围岩的损伤作用往往被忽视,Carter等^[12]的研究表明,岩体开挖卸荷速率越快,对围岩的破坏越大;Cai等^[13]研究发现,高地应力条件下与岩体开挖对应的应力路径对开挖损伤区有重要影响;卢文波等^[14]提出并论证岩体开挖荷载的释放为瞬态卸荷的特性,认为在中、高地应力条件下,需要考虑岩体开挖荷载的瞬态卸荷特性及其动力效应;王明洋等^[15]的研究表明,岩石快速卸载可导致岩体拉伸破坏;严鹏等^[16]在锦屏二级水电站辅助洞中的岩体损伤检测结果也表明,地应力的瞬态卸载是围岩损伤的重要原因。纵观现有研究成果,爆破开挖扰动对岩体损伤效应的研究主要集中于单独研究围岩应力重分布、爆炸荷载或开挖荷载瞬态卸荷对岩体的作用,而实际上,高地应力岩体爆破开挖过程中,因爆炸荷载作用产生开挖荷载瞬态卸荷,开挖荷载瞬态卸荷导致围岩应力重分布,三者不可分离,目前尚未见到分析三者耦合作用对岩体损伤的相关文献报导。

本文基于 LS-DYNA 动力有限元程序,研究深埋隧洞高地应力岩体爆破开挖中爆炸荷载、开挖荷载瞬态卸荷及围岩应力重分布耦合作用的数值模拟方法,分析高地应力岩体爆破开挖扰动对围岩的损伤效应,为评价深埋隧洞围岩损伤特征提供基础。

2 深埋隧洞岩体爆破开挖扰动机理

深埋隧洞岩体往往处于高地应力状态,高地应力岩体在爆破破岩过程中,相邻炮孔将在极短的时间(毫秒级)内贯通,形成新的自由面,被开挖岩体对轮廓面上保留岩体的约束荷载将在瞬间消失,即开挖荷载瞬态卸荷,将在围岩中激起瞬态卸载应力波,卸载应力波和爆炸应力波耦合在一起,对开挖段围岩产生损伤破坏作用,同时也可能会对本洞已开挖段围岩和相邻洞室围岩产生不利影响,引起围岩掉块或片状剥落,甚至有可能诱发岩爆。

爆破开挖扰动对围岩的影响,主要与爆炸荷载、开挖荷载瞬态卸荷及因开挖荷载卸荷而导致的围岩应力重分布相关,围岩应力重分布是开挖荷载瞬态卸荷的结果,因此,本文主要分析爆炸荷载及开挖荷载瞬态卸荷对围岩的影响。

2.1 爆炸荷载

爆炸荷载对岩体的扰动作用,主要受爆炸荷载

峰值及其变化过程的影响。在 C-J 条件下,炸药的瞬时爆轰平均压力为^[17-18]

$$P_0 = \frac{\rho_0 D^2}{2(1+\gamma)} \quad (1)$$

式中: P_0 为炸药的爆轰压力 (Pa); ρ_0 为岩石和炸药的密度 (g/cm^3); D 为炸药爆速 (m/s); γ 为炸药的等熵指数,一般取 3。

对于径向、轴向均不耦合装药的周边孔,空气间隙能有效降低作用于孔壁岩体的冲击压力峰值,此时不耦合装药条件下孔壁的初始冲击波峰值压力为^[17-18]

$$P_{b0} = P_0 \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^{2\gamma} \left(\frac{l_c}{l_b} \right)^{\gamma} n \quad (2)$$

式中: d_c 为装药直径; d_b 为炮孔直径; l_c 为药柱总长度; l_b 为炮孔装药段长度,取 $l_c = 0.5l_b$; n 为爆轰气体产物膨胀撞击孔壁时的压力增大系数, $n = 8 \sim 11$,对乳化炸药,约取 10。

结合文献[19]的研究成果,炮孔爆炸荷载作用过程 $P_b(t)$ 的曲线形式如图 1 所示, P_{b0} 为爆炸荷载峰值, t_r 为爆炸荷载上升时间, t_i 为卸荷边界上爆炸荷载与开挖荷载相等的时刻, t_d 为爆炸荷载正压作用时间。

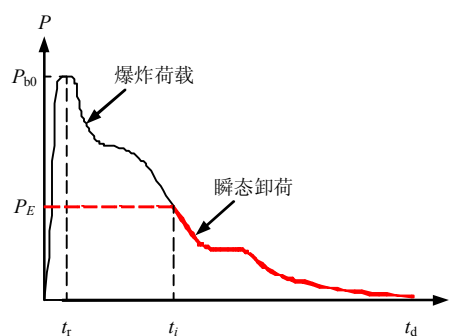


图 1 爆炸荷载和开挖荷载瞬态卸荷历程曲线
Fig.1 Curve of blasting load and transient release of excavation load versus time

2.2 开挖荷载瞬态卸荷

开挖荷载瞬态卸荷对围岩的扰动受开挖荷载峰值及卸载过程控制。

(1) 开挖荷载峰值

隧洞岩体开挖后,因开挖荷载卸荷导致围岩应力重分布。按平面应变问题研究围岩应力重分布,设 σ_H 和 σ_v 分别为初始竖直向和水平向地应力,则隧洞围岩各点的应力状态近似可按式 (3) 计算^[20]:

$$\left. \begin{aligned} P_{ri} &= \frac{\sigma_v}{2} \left[(1+\lambda)(1-\eta_i^2) - (1-\lambda)(1-4\eta_i^2+3\eta_i^4) \cos 2\varphi \right] \\ P_{\varphi i} &= \frac{\sigma_v}{2} \left[(1+\lambda)(1+\eta_i^2) + (1-\lambda)(1+3\eta_i^4) \cos 2\varphi \right] \\ P_{r\varphi i} &= \frac{\sigma_v}{2} (1-\lambda)(1+2\eta_i^2-3\eta_i^4) \sin 2\varphi \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: $\lambda = \sigma_H / \sigma_v$; $\eta_i = r_i / r_{i-1}$, r_i 和 r_{i-1} 为第 i 及第 $i-1$ 段雷管起爆所形成的洞室半径; P_{ri} 、 $P_{\varphi i}$ 、 $P_{r\varphi i}$ (统称 P_i) 为距隧洞中心点距离为 r_i 点的应力, 下标 r 、 φ 分别表示径向和环向; r_{i-1} 为已开挖洞室半径。

结合式 (3), 可得到深埋隧洞围岩轮廓面上与全断面分段微差起爆顺序对应的应力差值 P_E , 如式 (4), P_E 即为开挖荷载峰值。

$$P_E = P_i - P_{i-1} \quad (4)$$

对非圆形隧洞开挖掌子面上的岩体开挖荷载, 采用有限元等数值方法确定。

(2) 开挖卸荷过程

爆破过程中, 随着裂缝的发生与扩展, 开挖荷载在裂缝面上得到释放, 但在裂纹尖端表现为应力集中。因此, 在孔间裂纹贯穿前, 应力释放仅发生在局部区域, 宏观上的开挖荷载卸荷并没有发生。只有在裂纹贯穿、炮孔压力低于开挖荷载时, 才开始从宏观上体现卸荷效应。随着爆生气体逸出, 爆炸荷载进一步下降, 当炮孔压力降至大气压时, 才完成开挖荷载的同步卸荷。由于在开挖荷载卸载边界上要满足应力连续条件, 因此, 开挖荷载的瞬态卸荷起始时刻与持续时间均取决于爆炸荷载变化历程, 卸荷边界上的荷载大小应与爆生气体压力相等, 如图 1, t_i 时刻卸载开始后, 开挖荷载瞬态卸荷历程曲线与爆炸荷载作用历程重合。

3 岩体爆破开挖扰动的数值模拟方法

基于 Ls-dyna 动力有限元程序, 研究深部岩体爆破开挖扰动的数值模拟方法。

3.1 爆炸荷载的模拟

爆炸荷载主要可采取几种方法进行模拟: (1) 程序自带的炸药材料模型及 JWL 方程模拟爆炸荷载; (2) 炮孔之间施加等效爆炸荷载; (3) 炮孔壁上施加爆炸荷载曲线。程序自带的炸药材料模型及 JWL 方程模拟爆炸作用, 可较好地模拟爆炸荷载随时间的变化过程, 但在数值分析中, 由于炸药单元尺寸要求较小, 当起爆网路中的炮孔较多、模拟的结构

尺寸较大时, 将导致有限元分析过程中单元数量过多, 致使计算速度迅速降低。采用炮孔之间施加等效荷载的方法, 可较好地分析爆源远区的爆破振动特性, 但因爆炸荷载作用边界条件的改变, 将会改变炮孔近区的应力及振动特性, 不能分析炮孔近区岩体的动力响应特性。而在炮孔壁上施加爆炸荷载曲线的方法, 并利用图 1 中爆炸荷载变化曲线, 既可减少单元数量, 又可精确模拟炮孔近区的动力响应特性。在隧洞开挖过程中, 炮孔一般较多, 此时采用炮孔壁上施加爆炸荷载曲线的方法, 可降低计算量, 并得到合理结果。

3.2 边界条件的模拟

边界条件的处理一直是动力有限元分析的重点。隧洞开挖之前受到一个初始地应力的影响, 同时, 由于模拟分析范围有限, 因此, 存在一个人工截断边界, 对人工截断边界的处理, 一般有弹黏性边界、无反射边界、约束边界等。Ls-dyna 通常采用无反射边界限制模型的整体尺寸, 但当截断边界上有荷载或约束时, 再施加无反射边界, 则无反射边界将失去效用, 弹黏性边界又比较复杂, 此时, 可通过增大模型尺寸并控制计算时间以避免反射波对重点分析部位计算结果的影响。该增加边界的范围可用以下公式衡量:

$$L \geq \frac{C_p t}{2} \quad (5)$$

式中: L 为增大边界的范围; C_p 为岩体中纵波速度; t 为考察对象受荷载作用的振动持续时间。

对初始地应力的模拟, 根据岩体的实际应力状态, 将初始地应力作为一个恒荷载施加在截断边界上, 并对模型加载面以外的边界实行法向约束, 利用程序的动力松弛计算功能进行有加载瞬态分析的应力初始化, 从而实现初始地应力场的模拟。

3.3 开挖荷载瞬态卸荷的模拟

当炮孔裂纹贯穿、炮孔压力低于开挖荷载 P_E 时, 岩体在宏观上体现卸荷效应, 开挖荷载的瞬态卸荷起始时刻与持续时间均取决于爆炸荷载变化历程。开挖段的分析, 可通过设置单元失效准则模拟开挖效果, 但因大尺寸模型中很难模拟裂缝的扩展, 该方法得到的开挖轮廓与实际相差较远。此时, 结合实践工程中开挖轮廓面的形状, 在开挖轮廓面上施加荷载模拟被开挖岩体的支撑作用, 通过控制该荷载的作用过程, 模拟开挖荷载的瞬态卸荷过程。

根据式 (3), 岩体开挖后, 开挖荷载 P_E 是径向、环向及切向 3 个方向的应力, 而且方向各不相同, 该荷载无法精确施加到计算模型, 根据隧洞开挖荷

载的常规处理方法,将该应力荷载转换为节点反力荷载,施加节点反力模拟待开挖岩体的约束作用,如图 2 所示,通过控制节点反力的变化过程,即控制节点力卸荷过程,实现开挖荷载的卸荷。节点力卸荷的原理是将被开挖岩体对保留岩体的作用等效成节点力荷载,按照地应力瞬态卸荷的特征制定该荷载曲线,施加在已除去被开挖岩体的模型上,达到模拟开挖荷载瞬态卸荷的目的。

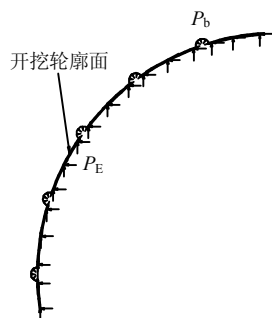


图 2 节点反力作用示意图
Fig.2 Sketch of the node counter-force

开挖荷载瞬态卸荷过程曲线见图 1 中虚线部分,开挖轮廓面上的应力,由初始状态经历一个持续作用时间段后开始卸载,其终止时刻与爆炸荷载作用的终止时刻一致。

4 爆破开挖扰动损伤效应的数值分析

4.1 岩体的强度准则

(1) 爆破开挖扰动下岩体的强度

岩体的强度与应变率相关,Olsson^[21]研究了凝灰岩在常温下应变率从 $10^{-6} \sim 10^4$ /s 时的单轴抗压强度变化规律,将其强度与应变率的关系表示为

$$\sigma_d \propto \begin{cases} \dot{\epsilon}^{0.007} & \dot{\epsilon} < 76 \text{ s}^{-1} \\ \dot{\epsilon}^{0.35} & \dot{\epsilon} \geq 76 \text{ s}^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

爆破过程中地应力瞬态卸载所引起的岩石应变率 $\dot{\epsilon}$ 约为 $10^{-1} \sim 10^1 \text{ s}^{-1}$ 量级^[22],因此,可以认为,地应力高速释放过程中应变率不会对岩石强度产生显著影响,而爆炸荷载作用下,应变率可达 10^3 以上,此时,岩体的动力强度有提高。

(2) 岩体损伤准则

动力荷载作用下,岩体的强度准则较多^[23-24],高地应力条件下地下洞室的爆破开挖,根据应力状态的不同,岩体可能表现出压剪和拉伸等损伤破坏特征。文献[16]采用 Griffith 强度准则分析岩体卸荷的破坏效应;Cai 等^[6]根据围岩中的应力重分布状态,判断损伤区的大小,其裂纹起裂和裂纹损伤应

该分别对应于损伤区和破坏区,围岩在压应力作用下的损伤准则选取为

$$\begin{cases} \sigma_1 - \sigma_3 = A\sigma_{cm} \\ \sigma_1 - \sigma_3 = B\sigma_{cm} \end{cases} \quad (7)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为最大和最小主应力; σ_{cm} 为岩体的单轴抗压强度; A 、 B 为材料相关常数,分别对应于岩体的裂纹起裂和裂纹损伤。大量的试验表明,对于完整或轻度节理岩体, A 、 B 的取值范围分别为 $0.4 \sim 0.5$ 和 $0.8 \sim 0.9$; 对于中度或重度节理岩体, A 、 B 的取值范围分别为 $0.5 \sim 0.6$ 和 $0.9 \sim 1.0$ 。

考虑岩体动态强度与应变率相关的特性,式(7)可修正为

$$\begin{cases} \sigma_1 - \sigma_3 = A\sigma_{cd} \\ \sigma_1 - \sigma_3 = B\sigma_{cd} \end{cases} \quad (8)$$

式中: σ_{cd} 为岩体的动态抗压强度。

洞室围岩在拉应力作用下形成的损伤破坏可参照第一强度理论,即最大拉应力准则:

$$\sigma_3 = -\sigma_{td} \quad (9)$$

式中: σ_3 为最小主应力; σ_{td} 为岩体的动抗拉强度。

本文采用经验公式(8)判断围岩的损伤与破坏范围,分析过程中,认为发生裂纹起裂的围岩区域即为损伤范围, A 值取为 0.5。

4.2 模型与参数

采用 Is-dyna 模拟爆破开挖扰动对深埋隧洞岩体的损伤破坏作用。

(1) 模型

工程实践中,主要关注开挖轮廓面部分的保留岩体,而掏槽及崩落孔爆破对保留围岩的影响范围,一般在轮廓爆破影响的范围内,故主要研究光面爆破开挖对围岩的损伤效应。根据隧洞钻孔爆破中常用的钻爆设计,如图 3 所示,建立二维有限元模型,其中炮孔直径为 42 mm,各段开挖半径见表 1,模型长宽为 160 m×160 m。

(2) 参数

岩体的本构关系采用塑性随动模型,考虑强度的应变率相关,应变率用 Cowper-Symonds 模型来考虑,用与应变率有关的因数表示屈服应力^[25]。岩体参数参照锦屏二级水电站引水隧洞的岩体力学参数取值,见表 2。应变率参数 C 和 P 通过材料动态强度随应变率的变化规律拟合得到。

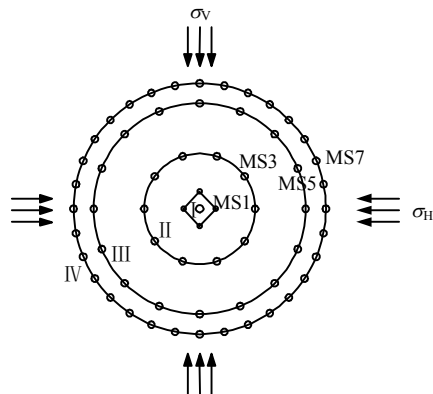


图 3 隧洞开挖钻爆设计图
Fig.3 Drilling and blasting design sketch of tunnel

表 1 隧洞各段爆破开挖半径
Talbe 1 Tunnel excavation radius of each section

序号	炮孔类别	开挖面半径 / m
1	掏槽孔	0.32
2	崩落孔	1.10
3	崩落孔	2.00
4	光爆孔	2.50

表 2 岩体的物理力学参数
Table 2 Parameters of rock mass

弹性模量 / GPa	岩体密度 / (g/cm ³)	泊松比	抗压强度 / MPa	切线模量 / GPa	参数 C	参数 P
40.0	2.65	0.22	50.0	6.0	40	2.2

研究过程中，竖直向地应力固定取 20 MPa，为分析不同地应力水平下爆破开挖扰动对围岩的损伤效应，考虑侧压力系数 λ 分别为 0.5、1.0 及 2.0。同一地应力水平下，为了比较爆破开挖扰动对围岩的损伤效应，计算 3 种工况：（1）仅考虑静态围岩应力重分布的影响；（2）考虑爆炸荷载和围岩应力重分布的影响；（3）考虑爆炸荷载、开挖荷载瞬态卸荷及因开挖荷载瞬态卸荷导致的围岩应力重分布共同作用的影响。

爆破开挖过程中，装药直径为 25 mm，炸药密度 1.1 g/cm³，爆速 4 000 m/s，爆炸荷载峰值 122.3 MPa，作用过程曲线如图 1 所示， $t_d \approx 8.0$ ms。根据爆炸荷载的变化过程及隧洞径向的开挖荷载大小，近似确定开挖荷载瞬态卸荷的起止时刻及变化规律，当侧压力系数 λ 为 1 时，隧洞顶拱部位节点的开挖荷载等效为节点反力后的卸荷过程曲线如图 4 所示。

4.3 计算结果

计算得到各种不同工况下隧洞围岩的损伤区分布见图 5，图中紧靠开挖轮廓面的是因开挖卸荷围岩应力重分布（准静态）所导致的损伤区，接着是

爆炸荷载与围岩应力 redistribution 作用下围岩的损伤区，最外部分为爆炸荷载、开挖荷载瞬态卸荷及围岩应力 redistribution 共同作用下的围岩损伤区。

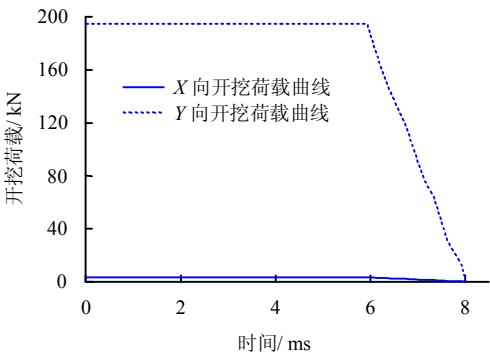


图 4 开挖荷载瞬态卸荷历程曲线
Fig.4 Curves of transient release of excavation load versus time

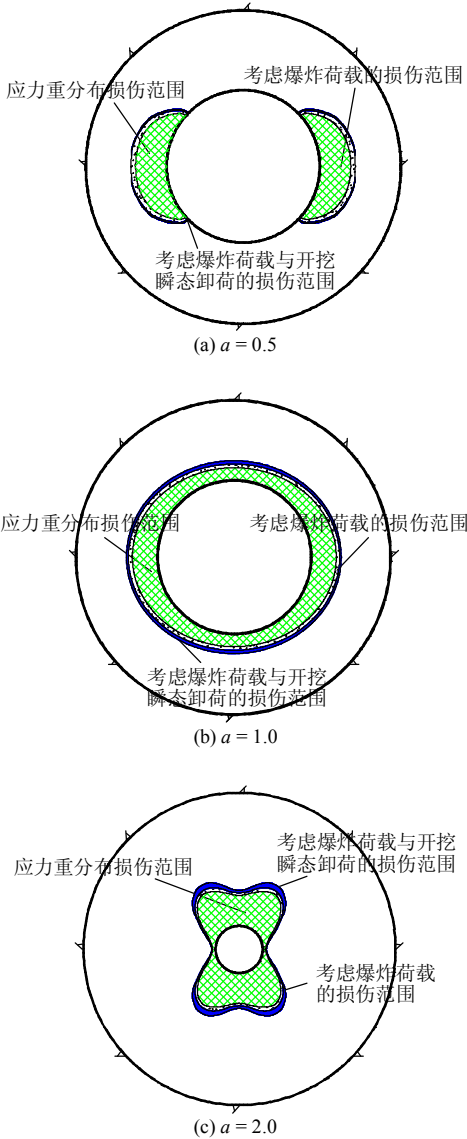


图 5 不同侧压力系数时的损伤区分布
Fig.5 The damage zone distribution under different lateral pressure coefficients

由图 5 可知,不同应力状态下,围岩的损伤区分布特征各不相同。当侧压力系数为 1 时,损伤区沿开挖轮廓面分布变化较小,受重力的影响,水平向和竖直向稍微不同;侧压力系数不为 1 时,损伤区主要出现在与最大地应力方向垂直的部位。各种工况下最大的损伤范围(开挖轮廓面的法向深度)见表 3。由表可知,应力重分布对围岩损伤最大,围岩损伤区主要由应力重分布所导致,爆炸荷载扰动将增大围岩损伤范围,考虑开挖荷载瞬态卸荷扰动的围岩损伤区最大。而且,当地应力较低时,开挖荷载瞬态卸荷作用增大的围岩损伤范围相对较小,甚至可以忽略,如图 5(a)所示,而当地应力较高时,开挖荷载瞬态卸荷可导致围岩损伤区显著增大,如图 5(c)所示。可见,在高地应力条件下,岩体开挖荷载的瞬态卸荷作用对围岩的损伤破坏作用不可忽视。

表 3 围岩最大损伤范围

Talbe 3 The maximum range of excavation damage zone

工况	损伤范围/m		
	$\lambda = 0.5$	$\lambda = 1.0$	$\lambda = 2.0$
应力重分布	0.97	0.82	4.12
应力重分布+爆炸荷载	1.15	0.93	4.55
爆炸荷载+开挖荷载瞬态卸荷	1.15	0.99	5.21

5 结 论

(1) 通过控制节点反力的变化过程模拟开挖荷载瞬态卸荷作用,同时采用爆炸荷载变化曲线模拟爆炸作用过程,可以分析岩体开挖过程中爆炸荷载及开挖荷载瞬态卸荷耦合作用对围岩的扰动。

(2) 爆破开挖扰动下,围岩应力重分布对围岩损伤最大,岩体的损伤区主要由围岩应力重分布导致,爆炸荷载作用将扩大围岩的损伤范围,考虑开挖荷载瞬态卸荷作用的围岩损伤范围最大。

(3) 不同地应力水平下,岩体开挖荷载瞬态卸荷作用对围岩的影响各不相同,当地应力较低时,开挖荷载瞬态卸荷对围岩的损伤较小,当围岩处于高地应力水平时,开挖荷载瞬态卸荷对围岩的损伤效应显著。

本文研究过程中,以均质岩体为研究对象,未考虑岩体结构面的影响,而岩体结构面对围岩应力卸载过程及损伤区分布有重要影响,该部分有待进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [2] 张传庆, 冯夏庭, 周辉, 等. 深部试验隧洞围岩脆性破坏及数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(10): 2063—2068.
ZHANG Chuan-qing, FENG Xia-ting, ZHOU Hui, et al. Brittle failure of surrounding rock mass in deep test tunnels and its numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(10): 2063—2068.
- [3] 魏进兵, 邓建辉. 高地应力条件下大型地下厂房松动区变化规律及参数反演[J]. 岩土力学, 2010, 31(增 1): 330—336.
WEI Jin-bing, DENG Jian-hui. Variation of excavation damaged zone and back analysis of large scale underground powerhouse with high geostress[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(Supp.1): 330—336.
- [4] KWON S, LEE C S, CHO S J, et al. An investigation of the excavation damaged zone at the KAERI underground research tunnel[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2009, 24(1): 1—13.
- [5] READ R S. 20 years of excavation response studies at AECL's underground research laboratory[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(8): 1251—1275.
- [6] CAI M, TASAKA P K, MAEJIMA Y, et al. Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(5): 833—847.
- [7] 李宁, 陈蕴生, 韩火亘. 岩石在爆破下的动力损伤特性研究[J]. 工程爆破, 1997, 3(2): 17—22.
LI Ning, CHEN Yun-sheng, HAN Huo-yuan, et al. Study on dynamic damage behavior of rock under blasting[J]. **Engineering Blasting**, 1997, 3(2): 17—22.
- [8] 杨小林, 王梦恕. 爆生气体作用下岩石裂纹的扩展机理[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(2): 111—116.
YANG Xiao-lin, WANG Meng-shu. Mechanism of rock crack growth under detonation gas loading[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2001, 21(2): 111—116.
- [9] MA G W, AN X M. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 45(6): 966—975.

- [10] ZHU Z M, MOHANTY B, XIE H P. Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and propagation in rocks[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2007, 44(3): 412—424.
- [11] 肖明, 张雨霆, 陈俊涛, 等. 地下洞室开挖爆破围岩松动圈的数值分析计算[J]. 岩土力学, 2010, 31(8): 2613—2618.
- XIAO Ming, ZHANG Yu-ting, CHEN Jun-tao, et al. Numerical analysis of excavation damaged zone of underground caverns induced by excavation blasting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(8): 2613—2618.
- [12] CARTER J P, BOOKER J R. Sudden excavation of a long circular tunnel in elastic ground[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1990, 27(2): 129—132.
- [13] CAI M. Influence of stress path on tunnel excavation response——Numerical tool selection and modeling strategy[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2008, 23(6): 618—628.
- [14] 卢文波, 周创兵, 陈明, 等. 开挖卸荷的瞬态特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(11): 2184—2192.
- LU Wen-bo, ZHOU Chuang-bing, CHEN Ming, et al. Research on transient characteristics of excavation unloading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(11): 2184—2192.
- [15] 王明洋, 范鹏贤, 李文培. 岩石的劈裂和卸载破坏机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 234—241.
- WANG Ming-yang, FAN Peng-xian, LI Wen-pei, et al. Mechanism of splitting and unloading failure of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 234—241.
- [16] 严鹏, 卢文波, 单治钢, 等. 深埋隧洞爆破开挖损伤区检测及特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1552—1561.
- YAN Peng, LU Wen-bo, SHAN Zhi-gang, et al. Detecting and study of blasting excavation-induced damage of deep tunnel and its characters[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(8): 1552—1561.
- [17] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [18] 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.
- [19] 杨建华, 卢文波, 陈明. 炮孔爆炸荷载变化历程的确定[C]//第二届全国工程安全与防护学术会议. 北京: 2010, 773—777.
- [20] 卢文波, 陈明, 严鹏, 等. 高地应力条件下隧洞开挖诱发围岩振动特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增1): 3329—3334.
- LU Wen-bo, CHEN Ming, YAN Peng, et al. Study on vibration characteristics of surrounding rock induced by tunnel excavation under high in-situ stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(Sup.1): 3329—3334.
- [21] OLSSON W A. The compressive strength of tuff as a function of strain rate from 10⁻⁶ to 10³s⁻¹[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1991, 28(1): 115—118.
- [22] 祝启虎. 地应力瞬态卸荷对围岩损伤特征的影响[博士学位论文D]. 武汉: 武汉大学, 2010.
- [23] 钱七虎, 戚承志. 岩石、岩体的动力强度与动力破坏准则[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, 36(12): 1599—1605.
- QIAN Qi-hu, QI Chen-zhi. Dynamic strength and dynamic fracture criteria of rock and rock mass[J]. **Journal of Tongji University (Natural Science)**, 2008, 36(12): 1599—1605.
- [24] 单仁亮, 薛友松, 张倩. 岩石动态破坏的时效损伤本构模型[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1771—1776.
- SHAN Ren-liang, XUE You-song, ZHANG Qian. Time dependent damage model of rock under dynamic loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22(11): 1771—1776.
- [25] LSTC. LS-DYNA keyword user's manual, version 970[M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2003.