

文章编号: 0253-9993(2009)08-1057-06

# 基于动力学机理的施工期岩爆主动防治初探

严鹏<sup>1,2,3</sup>, 李天斌<sup>2</sup>, 卢文波<sup>3</sup>, 陈明<sup>3</sup>, 周创兵<sup>3</sup>

(1. 中国水电顾问集团华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014; 2. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 3. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072)

**摘要:** 采用 Laplace 变换方法得到了静水应力场中爆破开挖时初始地应力动态卸载所诱发的围岩振动, 并和爆炸荷载所诱发的围岩振动进行了比较。结果表明, 初始地应力动态卸载扰动是整个开挖扰动的重要组成部分, 在一定的地应力水平下甚至有可能超过爆破扰动成为开挖扰动的主要成分。基于此, 提出了以优化钻爆网络和起爆顺序为核心的爆破开挖扰动控制方法, 该方法可以同时减小爆炸荷载引起的扰动和地应力高速卸载所引起的振动, 可从一定程度上实现对岩爆的主动控制。二滩水电站和瀑布沟水电站地下厂房的开挖实例证明了此方法的有效性和实用性。

**关键词:** 岩爆; 高地应力; 钻爆开挖; 动态卸载

中图分类号: TU452 文献标识码: A

## Initiative control of rock-burst under excavating based on the dynamic mechanism

YAN Peng<sup>1,2,3</sup>, LI Tian-bin<sup>2</sup>, LU Wen-bo<sup>3</sup>, CHEN Ming<sup>3</sup>, ZHOU Chuang-bing<sup>3</sup>

(1. East China Investigation and Design Institution of China Hydropower Engineering Consulting Group Co., Hangzhou 310014, China; 2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 3. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Adopting the Laplace transform method, the dynamic stress stimulated by in-situ stress transient unloading in hydro-static stress field was calculated, and the characters of the vibration of surrounding rock caused by dynamic unloading of in-situ stress were studied and compared with that of the vibration induced by blasting load. The results indicate that In-situ Stress Dynamic Unloading Disturbance (ISDUD) is an important part of Excavation Disturbance (ED), and the ISDUD could exceed the blast load-induced disturbance and become the dominant component of ED under certain level of geo-stress. Based on this conclusion, the idea of initiative control on rock-burst during the excavation process under high geo-stress condition was presented, and the primary practical measures of minimizing the ED and preventing rock-burst were advised, the core of which was optimization of initiation network and procedure. Application of this method in excavation process of underground powerhouse of Ertan and Pubugou projects verified the availability of it.

**Key words:** rock-burst; high geo-stress; drilling and blasting; dynamic unloading

岩爆是开挖诱发的、开挖空间周围岩体的突然破坏, 伴随着受压岩石的应变能的突然释放, 往往是以

收稿日期: 2008-08-29 责任编辑: 常琛

基金项目: 国家自然科学基金委-雅砻江水电开发联合基金资助项目(50639100); 国家杰出青年科学基金项目(50725931); 国家自然科学基金面上项目(50779050); 湖北省自然科学基金杰出青年人才项目(2007ABB026); 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室(成都理工大学)开放基金资助项目(GZ2009-15)

作者简介: 严鹏(1981—), 男, 湖北天门人, 工程师, 博士. Tel: 0571-56738877, E-mail: yansd034@yahoo.com.cn

岩片弹出、大量岩石坍塌或矿震的形式表现出来的动力现象，并造成开挖工作面的严重破坏及设备损坏，甚至有可能引起人员伤亡。文献 [1] 认为，岩爆是处于高地应力环境中的完整硬脆性围岩，在隧道开挖后，切应力达到或接近围岩单轴抗压强度，在其它因素的诱发下，以岩爆的形式失稳。这可以被总结为岩爆形成机制的静荷载（静力学）理论，它也是目前广泛采用的岩爆预测判据的理论依据<sup>[2]</sup>。徐则民、黄润秋<sup>[3]</sup>提出了岩爆的动力学机理，认为岩石静力学理论在岩爆研究中是重要的，但它还不能阐明岩爆的全部机理。钻爆法开挖过程中，各炮层的顺序起爆、周边眼起爆后开挖轮廓面的瞬时大幅卸载及岩爆事件本身所产生的各类高幅值、陡波前应力波以及它们的叠加效应，会在微观-细观尺度上引起围岩累积性损伤的加剧与局部应力环境的恶化，并最终导致裂纹的大规模瞬时动力扩展，伴随晶间、粒间瞬态应变能的高速释放，围岩便会以岩爆的形式失稳。岩爆的动力学机理实际上强调了开挖卸载过程及开挖过程中的动态扰动对与岩爆孕育和发生的重要意义<sup>[4]</sup>，但动态卸载效应对岩爆的具体贡献仍然只停留在定性研究的阶段。

事实上，爆破开挖过程中，开挖边界上的初始地应力在很短的时间内（约几十毫秒）卸除，易长平、卢文波等<sup>[5]</sup>和严鹏等<sup>[6]</sup>的研究发现，爆破开挖过程中的地应力卸载是一个区别于常规准静态卸载过程的动态卸载过程，在这个过程中不能忽略岩体惯性力的影响，中高地应力状态下岩体爆破开挖引起的卸载波是导致岩体开挖松动的重要因素。J. Miklowitz<sup>[7]</sup>早在 1960 年就注意到在一张紧的圆板中间快速冲切一个圆孔时所诱发的初始应力的动态卸载效应，罗先启<sup>[8]</sup>认为在压缩应力场中的脆性材料，在开挖边界上突然卸载，卸载波迅速从开挖边界传播至岩体深部，引起初始损伤的扩展演化。若岩体中由于弹性压缩所贮存的势能足够大，则位于卸荷波前缘的剪切微裂纹，将因动力扩展而导致岩体破坏诱发了岩爆。何满潮等<sup>[9]</sup>则设计了可以突然卸载某一方向外力的岩爆模拟试验系统，在实验室里再现了应力突然卸载造成的岩爆现象。

本文利用 Laplace 变换求解了静水应力场中圆形洞室开挖时爆炸荷载和初始地应力瞬态卸载所分别激发的围岩振动，并比较了二者的特性，重新解释了高地应力条件下钻爆开挖过程对隧洞围岩所造成的扰动的构成，并基于此初步建议了高地应力条件下隧洞爆破开挖过程中减小开挖过程对围岩扰动、主动控制岩爆发生的具体措施。

## 1 爆破开挖扰动的构成

考虑在一初始地应力均匀分布（即水平地应力和垂直地应力相等）的无限山体中开挖一圆形隧洞，且隧洞截面较小（ $D \leq 10$  m），全断面一次爆破开挖成型。该隧洞开挖的典型钻爆设计如图 1 所示，由里往外，开挖工作面上依次布置了 2 圈掏槽孔、3 圈崩落孔、1 圈缓冲孔和周边光爆孔，分别采用国产系列毫秒非电塑料导爆管雷管起爆，图中的 MS 代表 ms，后面数字代表段别。一次开挖进尺 3 m，炮孔直径 45 mm，掏槽孔孔距 40~50 cm，崩落孔孔距 70~100 cm，周边孔孔距 80 cm。采用 2 号岩石乳化炸药，炸药密度  $\rho_0 = 1\ 000\ \text{kg/m}^3$ ，炸药爆速  $D = 3\ 400\ \text{m/s}$ 。

### 1.1 爆破荷载的确定

确定爆炸荷载，首先要确定炮孔内炸药爆炸后在孔壁上所产生的峰值压力。对于不耦合装药，爆轰产物在空气间隙中按两段式的状态方程绝热膨胀，即

$$P_D V_D^\gamma = P V^\gamma, \quad (1)$$

式中， $P_D$ 、 $V_D$  和  $P$ 、 $V$  分别为初始状态和终了状态的压强和体积； $\gamma$  为爆轰产物的绝热指数，当  $P \geq P_k$

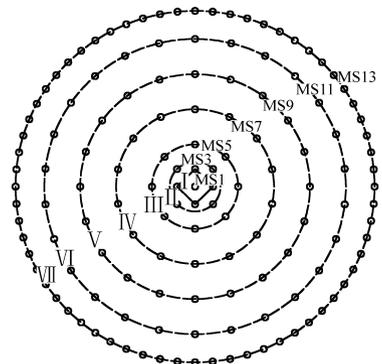


图 1 圆形隧洞开挖钻爆设计

Fig. 1 Design of drill-blasting excavation of circular tunnel

时, 取  $\gamma \approx 3.0$ , 当  $P < P_k$  时, 取  $\gamma \approx 1.4$ ;  $P_k$  为爆轰产物的临界压力, 根据文献 [10], 取  $P_k = 100$  MPa.

由式 (1) 可计算得到爆轰产物膨胀到孔壁时作用在孔壁上的爆轰峰压  $P_0$ , 然后根据圣维南原理, 将  $P_0$  近似等效作用在同排齐响炮孔中心连线与炮孔轴线所确定的面上, 即得到爆炸荷载等效平均压力  $\bar{P}_0$ .

对于爆炸荷载的形式, 在实际工程应用中, 使用最为广泛的是三角形荷载. 本文计算中也采用三角形荷载, 取压力作用时间  $t_1 = 250 \mu\text{s}$ , 其中峰值压力上升时间  $t_0 = 50 \mu\text{s}$ , 如图 2 (a) 所示.

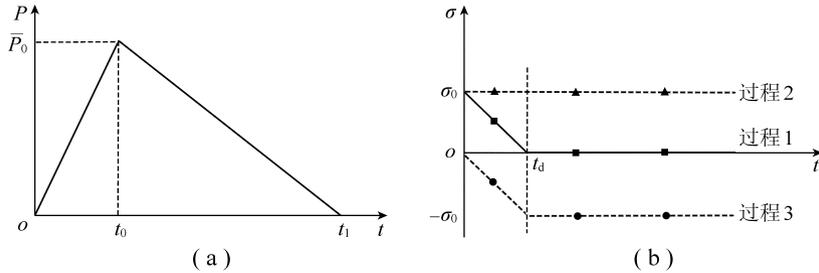


图 2 爆炸荷载曲线 (a) 和初始应力动态卸载曲线 (b)

Fig. 2 The curves of blasting load (a) and initial stress dynamic unloading (b)

## 1.2 轮廓面上初始应力及其卸载形式

根据弹性静力学理论, 在径向均匀受压的无限薄板中掏出 1 个半径为  $a_0$  的圆形孔洞, 应力重新分布稳定后, 弹性板中距离圆孔中心  $r$  处的径向应力为

$$\sigma_r = (1 - a_0^2/r^2) \sigma_0. \quad (2)$$

根据式 (2), 可以计算每圈炮孔起爆时其轮廓面上初始应力值, 此时  $a_0$  为前一圈炮孔的半径;  $r$  为本圈炮孔的半径;  $\sigma_0$  为远场初始地应力值. 在本文的计算模型中, 开挖工作面上的炮孔起爆顺序为掏槽孔、崩落孔、缓冲孔和周边孔, 由内往轮廓方向逐圈以间隔时间 25 ~ 50 ms 的微差起爆. 因此, 隧洞全断面开挖中, 必须考虑微差起爆顺序及间隔时间, 确定与起爆顺序对应的分步开挖地应力幅值.

如图 2 (b) 所示, 当开挖边界上的炮孔起爆时, 隧洞壁面上的径向应力在很短的时间  $t_d$  内变为 0 (假定初始应力按直线方式卸除, 如图 2 (b) 中过程 1 曲线所示), 这个过程所激起的卸载波从隧洞壁面开始向四周岩体内传播. 假设在初始地应力动态卸载的过程中, 岩体始终处于线弹性范围内, 应力过程 1 可以分解为压应力过程 2 和拉应力过程 3 的叠加<sup>[7]</sup>. 爆破施工中, 笔者认为被爆岩体脱离母岩的时刻初始应力卸载完成, 结合文献 [5-7] 的研究结论, 取初始应力卸载时间  $t_d = 2$  ms.

## 1.3 问题的求解

根据上面的简化, 钻孔爆破过程中, 爆炸荷载作用和初始应力动态卸荷的问题归结为柱腔激发问题: 处于初始无应力状态的无限弹性介质 (各向同性) 中的柱形空腔,  $t = 0$  时, 有一随时间变化的外力  $\sigma(t)$  作用在腔壁上. 设柱腔半径为  $a$ , 规定压力为正, 拉力为负, 考虑平面应变的情况, 在柱坐标系下, 该问题中弹性波的控制方程和初值条件<sup>[6]</sup>为

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = \frac{1}{C_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \\ \sigma_r(r, t) = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial r} + \lambda \frac{u}{r}, \\ \sigma_\theta(r, t) = \lambda \frac{\partial u}{\partial r} + (\lambda + 2\mu) \frac{u}{r}, \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $u(r, t)$  为介质质点径向位移, m;  $r$  为介质质点距球腔中心的距离, m;  $\sigma_r, \sigma_\theta$  分别为柱面波在介质中引起的径、切向应力, Pa;  $\lambda, \mu$  为拉梅常数;  $C_p$  为介质的弹性纵波波速, m/s,  $C_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu) / \rho}$ ,  $\rho$  为介质密度, kg/m<sup>3</sup>.

结合初始条件和边界条件, 本文利用 Laplace 变换方法求得了问题的解, 爆炸荷载作用和初始应力动态卸荷二者所分别诱发的振动, 即

$$v_r(r, t) = -\frac{\sigma_0}{2\pi i} \int_B b(s) F(s) e^{st} ds, \quad (4)$$

式中,  $v_r$  为爆炸荷载或初始应力动态卸荷在围岩中所引起的径向质点峰值振速;  $s$  为  $t$  的 Laplace 变换;

$F(s) = \frac{sK_1(sr/C_p)}{(2\mu/a)K_1(sr/C_p) + (s/C_p)K_0(sa/C_p)}$ ; 对于爆炸荷载  $b(s) = \frac{(t_1 - t_0) - t_1 e^{-t_0 s} + t_0 e^{-t_1 s}}{s^2 t_0(t_1 - t_0)}$ , 对于地应

力动态卸载  $b(s) = \frac{1 - t_1 e^{-t_0 s}}{s^2 t_0}$ ;  $i$  为虚数单位;  $B$  为 Bromwich 围道积分路径;  $K_1$  和  $K_0$  为第 2 类 1, 0 阶贝塞尔函数。

从式 (4) 可以看出, 爆炸荷载和地应力动态卸载在隧洞设计轮廓线以外的岩体中所引起的震动除了与其相应的激发荷载有关外, 还与荷载作用面积的大小有关。荷载值越大, 其作用面积越大, 其所诱发的围岩质点震动越大。

#### 1.4 计算结果分析

利用式 (4) 可以得到爆炸荷载以及初始应力动态卸荷在围岩中所引起的径向质点振速。计算中岩石弹性模量  $E = 45 \text{ GPa}$ , 密度为  $2700 \text{ kg/m}^3$ , 泊松比为 0.23, 纵波波速为  $4395.6 \text{ m/s}$ 。

图 3 给出了爆炸荷载作用下第 V 圈炮孔起爆和不同地应力水平下第 VI 圈炮孔轮廓面上初始应力动态卸荷所引起的质点峰值振速。从图 3 可看出, 当初始应力值为 20 MPa 时,  $r = 5.5 \text{ m}$  以外初始应力动态卸荷所引起的质点峰值振速大于爆破荷载所引起的质点峰值振速; 当初始应力值为 10 MPa 时, 这一分界点出现在  $r = 8.0 \text{ m}$  处; 当初始应力值为 5 MPa 时,  $r = 12.8 \text{ m}$ , 可见初始地应力水平越高, 其动态卸荷在围岩中引起的质点振速越大, 和爆炸荷载所诱发的震动相比, 在越大的范围内占据主导地位。可见, 在高地应力地区进行地下洞室开挖时, 初始地应力动态卸载效应更加需要得到重视。

针对开挖过程中动态扰动的构成及特点, 在隧洞施工过程中, 可以采取适当的工程措施来控制 and 减小开挖扰动对高应力集中区围岩的影响, 就可以大大降低其灾变破坏的可能, 从而达到主动控制岩爆的目的。

## 2 岩爆主动防治的原理及措施

工程实践表明, 绝大多数岩爆都发生在工作面附近一定范围内, 岩爆高峰区段随着工作面的前进而被向前拖动, 但和工作面的间距一般保持不变。工作面和高应力区段以外也有岩爆发生, 但是发生几率相对很小。天生桥引水隧洞岩爆主要发生距离工作面  $5 \sim 10 \text{ m}$  的地方; 太平驿电站岩爆主要发生在距离工作面  $2 \sim 30 \text{ m}$  的区段; 二滩水电站左导流洞岩爆一般发生在距离工作面  $2 \sim 10 \text{ m}$  的范围内。这些工程实录足以表明爆破对岩爆发生的控制作用<sup>[1]</sup>。由于高地应力条件下的爆破开挖扰动由爆炸荷载诱发的扰动和地应力动态卸载所诱发的扰动二者组成, 因此, 控制爆破开挖扰动的具体措施就可以从控制爆炸荷载扰动和控制地应力动态卸载扰动两个方面来制定。

隧洞施工中常用的控制爆破扰动的的方法是“短进尺、弱爆破”, 而且这一方法在天生桥二级电站引水隧洞、二郎山公路隧道、秦岭铁路隧洞等诸多工程实践中被证明是十分有效的岩爆控制措施<sup>[1-2]</sup>。根据本

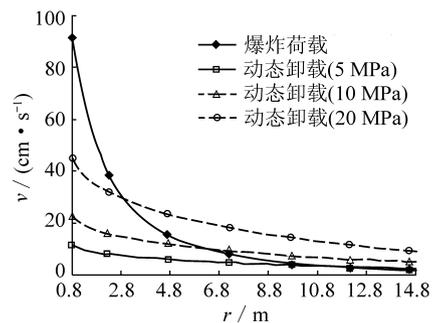


图 3 爆炸荷载和不同地应力水平下初始应力动态卸荷引起的最大质点峰值振速

Fig. 3 Vibration velocity induced by blasting load and several levels of geo-stress dynamic unloading



## 参考文献:

- [1] 张咸恭, 王思敬, 张倬元, 等. 中国工程地质学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000.  
Zhang Xiangong, Wang Sijing, Zhang Zhuoyuan, et al. China engineering geology [M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [2] 徐则民, 黄润秋. 长大隧道岩爆灾害研究进展 [J]. 自然灾害学报, 2004, 13 (2): 16-24.  
Xu Zemin, Huang Runqiu. Progress in research on rock burst hazard of long tunnel with large section [J]. Journal of Natural Disasters, 2004, 13 (2): 16-24.
- [3] 徐则民, 黄润秋, 罗杏春, 等. 静荷载理论在岩爆研究中的局限性及岩爆岩石动力学机理的初步分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (8): 1 255-1 262.  
Xu Zemin, Huang Runqiu, Luo Xingchun, et al. Limitations of static load theory in rockburst research and preliminary analysis on dynamics mechanism of rockburst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22 (8): 1 255-1 262.
- [4] 谢勇谋, 李天斌. 爆破对岩爆产生作用的初步探讨 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2004, 15 (1): 61-64.  
Xie Yongmou, Li Tianbin. Primary discussion on blast's affection on rock burst [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2004, 15 (1): 61-64.
- [5] 易长平, 卢文波, 许红涛, 等. 岩体开挖过程初始应力的动态卸荷效应研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24 (S1): 4 750-4 754.  
Yi Changping, Lu Wenbo, Xu Hongtao, et al. The dynamic unloading effect study of initial stress field in excavation process of large-scale rock mass structure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24 (S1): 4 750-4 754.
- [6] 严 鹏, 卢文波, 许红涛. 高地应力条件下隧洞开挖动态卸荷的破坏机理初探 [J]. 爆炸与冲击, 2007, 27 (3): 283-288.  
Yan Peng, Lu Wenbo, Xu Hongtao. Primary study to damage mechanism of initial stress dynamic unloading when excavating under high geo-stress condition [J]. Explosion and Shock Waves, 2007, 27 (3): 283-288.
- [7] Miklowitz J. Plane-stress unloading waves emanating from a suddenly punched hole in a stretched elastic plate [J]. Journal of Applied Mechanics, 1960, 27 (4): 165-171.
- [8] 罗先启, 舒茂修. 岩爆的动力断裂判据——D判据 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 1996, 7 (2): 1-5.  
Luo Xianqi, Shu Maoxiu. Dynamic fracture criterion of rock blasting: D criterion [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1996, 7 (2): 1-5.
- [9] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (5): 865-876.  
He Manchao, Miao Jinli, Li Dejian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26 (5): 865-876.
- [10] 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.  
Dai Jun. Properties of rock dynamics and blasting theory [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2002.
- [11] 李正刚. 二滩水电站地下厂房系统洞室围岩变形研究 [J]. 四川水力发电, 2004, 23 (1): 43-47.  
Li Zhenggang. Study to the deformation of the surrounding rock of of Ertan underground power house [J]. Sichuan Water Power, 2004, 23 (1): 43-47.