

深部岩石巷道爆破卸荷的破裂范围研究

刘 伟^{1,2}, 张 伟^{1,3}, 陈士海^{1,2}

- (1. 山东科技大学 土木建筑学院, 山东 青岛 266590;
2. 山东科技大学 山东省土木工程防灾重点实验室, 山东 青岛 266590;
3. 山东交通学院 土木工程学院, 山东 济南 250023)

摘 要:采用弹性动力学方法,利用拉普拉斯变换和卷积定理求解岩石巷道爆破卸荷瞬态应力场,结合Hopkinson动态破裂理论,给出了深部岩石巷道爆破卸荷破裂情况和瞬态卸荷破裂范围,说明了动态卸载扰动更易诱发岩爆灾害。算例表明,该理论和方法能正确地反应深部巷道开挖引起的围岩体的动态过程,并能有效地评价开挖卸荷引起的围岩体的破坏形态。

关键词:深部巷道;破裂;岩石;爆破;瞬态应力场

中图分类号:TD313 文献标志码:A 文章编号:1672-3767(2013)02-0066-05

Study on Cracking Area of Deep Rock Tunnel under Blasting Unloading

Liu Wei^{1,2}, Zhang Wei^{1,3}, Chen Shihai^{1,2}

- (1. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
2. Shandong Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;
3. College of Architecture and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan, Shandong 250023, China)

Abstract: Elastic dynamics, Laplace transform and convolution theorem used to solve the transient stress field of blasting unloading around the rock tunnel. Combined with Hopkinson dynamic rupture theory, the cracking situation and the cracking area of the blasting transient unloading of the deep rock tunnel were given, and the result that the dynamic unloading disturbance brings about the rock burst disaster more easily was explained. The example shows that the theory and method can correctly reflect the dynamic process caused by excavation and effectively estimate the destruction form of the rock mass induced by excavating unloading.

Key words: deep tunnel; cracking; rock; blasting; transient stress field

长期以来,对地下巷道围岩的应力-应变状态变化的研究,主要是利用弹塑性力学工具,并在连续介质力学模型的范畴内进行的。因巷道的开挖、应力集中及应力重分布,在地下巷道周围划分出了相互依次配置的区域:巷道周边的破坏区、非弹性变形区和岩体“未扰动”区。这些区域的范围,由岩体的自然应力场和变形-强度特征值来决定,但对于深部工程来说,深部采矿的实质是对处于高应力状态的岩石进行卸载和动力扰动的过程,如爆破振动、开挖卸载等都是动载荷。深部岩体工程稳定性和破坏是典型的动静加载下岩石的变形与破坏问题,此时的岩石与岩石工程系统的非线性特征比浅部开采岩体的非线性特征明显,也只有动力水平上掌握它的动态规律,才能对深部岩石巷道爆破过程做出可靠预测和有效控制。深部巷道的爆破开挖

收稿日期:2012-07-07

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金项目(20113718110002)

作者简介:刘 伟(1988—),男,山东莱芜人,硕士研究生,主要从事防灾减灾方面的研究工作。E-mail:601746377@qq.com

陈士海(1964—),男,山东新泰人,教授,博士生导师,主要从事爆破灾害预测与控制技术研究。

E-mail:cshblast@163.com

不同于人工与机械化开挖方法,表现在:一方面爆破开挖瞬间围岩受爆炸荷载强度大(大于原岩应力);另一方面爆破破岩开挖卸荷的速度快,属于典型的瞬态卸荷过程(非准静态卸荷)。相对来讲,准静态卸荷作用下的围岩破裂研究较多^[1-3],而瞬态卸荷的破裂研究较少。本研究采用理论计算方法分析深埋圆形巷道钻爆开挖时的动态卸荷效应,计算在岩体中所造成的破裂范围。

1 瞬态卸荷力学模型

在矿山深部岩体中开挖一条长形圆巷道,取弹性平面应变模型,全断面一次爆破开挖成型。假设岩体处于静水压力状态,其开挖问题可分为两个问题的叠加^[4-5]:一是在无穷远处作用有原岩应力 p, q ,由原岩应力所引起的应力和位移;二是无原岩应力的作用,在开挖瞬间 $t = 0$ 时刻,在洞室内壁上突然作用有一个均布卸荷压力 $p(t)$ 所产生的应力和应变。两者之和为开挖瞬间围岩介质的应力场,如图 1 所示。

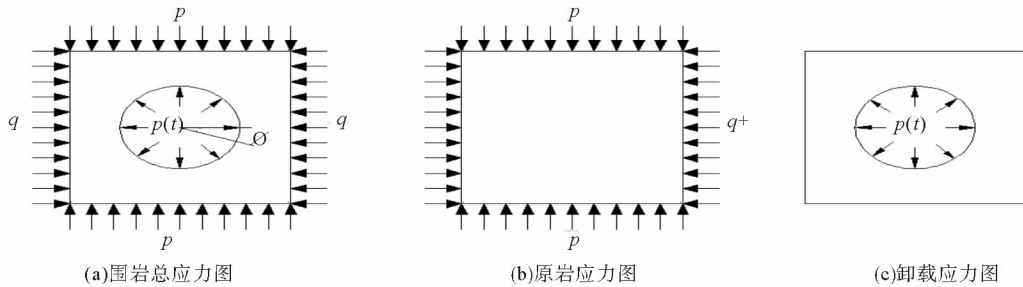


图 1 圆形巷道开挖过程力学模型图

Fig. 1 Mechanical model of circular tunnel during excavation

2 原岩应力场的求解

坐标原点取巷道横断面中心,用极坐标求解。根据弹性力学理论^[6],原岩应力场为:

$$\sigma'_r = \frac{p+q}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{q-p}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) (1 - 3 \frac{a^2}{r^2}) \cos(2\varphi); \quad (1)$$

$$\sigma'_\varphi = \frac{p+q}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{q-p}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4}\right) \cos(2\varphi); \quad (2)$$

$$\tau'_{r\varphi} = \tau_{\varphi r} = -\frac{q-p}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \left(1 + 3 \frac{a^2}{r^2}\right) \sin(2\varphi). \quad (3)$$

其中: a 为所开挖的巷道半径; r 为考察点距巷道中心半径; φ 为环向坐标。则当 $a=0$ 时,上式变为:

$$\sigma'_r = \frac{p+q}{2} + \frac{q-p}{2} \cos(2\varphi); \quad (4)$$

$$\sigma'_\varphi = \frac{p+q}{2} - \frac{q-p}{2} \cos(2\varphi); \quad (5)$$

$$\sigma'_\varphi = \frac{p+q}{2} - \frac{q-p}{2} \cos(2\varphi). \quad (6)$$

即为所求的初始应力状态。静水压力 p_0 时,应力场为: $\sigma'_r = \sigma'_\varphi = p_0, \tau'_{r\varphi} = \tau'_{\varphi r} = 0$ 。

3 瞬态应力场的求解

处于初始无应力状态的无限弹性介质中的柱形空腔, $t=0$ 时,有一随时间变化的径向作用力 $p(t)$ 作用在腔壁上。该作用力从爆炸荷载压力开始卸载到与原岩应力状态相等阶段为爆炸瞬态卸荷过程,从腔室压力等于原岩应力到卸载荷载为 0 阶段为原岩应力卸载的准静态卸载过程。在此只讨论爆炸瞬态卸荷过程(图 2)。

在平面应变的情况下,该问题中弹性波的控制方程为^[7-8]:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} = \frac{1}{c_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \quad (7)$$

$$\sigma''_r = (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial r} + \lambda \frac{u}{r}; \quad (8)$$

$$\sigma''_\varphi = \lambda \frac{\partial u}{\partial r} + (\lambda + 2\mu) \frac{u}{r}. \quad (9)$$

岩体爆破开挖,意味着岩体开挖荷载的瞬态卸荷及岩体所积累弹性应变能的快速释放,当作用在保留岩体开挖面上的爆轰压力急剧衰减时,产生相对较高的垂直于壁面的卸荷拉伸力,当拉伸应力大到一定程度时,就会对开挖面附近岩体形成拉伸变形破坏,导致岩体局部失稳或开裂。则初、边值条件为:

$$u(r, t) = \frac{\partial u(r, t)}{\partial t} = 0, r \geq a, t < 0; \quad (10)$$

$$p(t) = [\sigma''(r, t)]_{r=a} = \begin{cases} 0, & t \leq 0 \\ -\frac{p_s - p_0}{t_0} t, & 0 < t \leq t_0 \\ p_0 - p_s, & t > t_0 \end{cases}; \quad (11)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} u(r, t) = 0, t > 0. \quad (12)$$

其中: $u(r, t)$ 为介质质点径向位移; $\sigma''_r, \sigma''_\varphi$ 分别为卸载柱面波在介质中引起的径向应力和环向应力; λ, μ 为拉梅常数; c_p 介质弹性纵波波速, $c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$; ρ 介质密度; t_0 瞬态卸载时间,取 $t_0 = 2 \text{ ms}$; p_s 爆炸荷载压力,考虑爆破破碎区衰减和炮孔间距等因素, $p_s = \frac{1}{160} \rho_0 D^2$; ρ_0 和 D 分别为炸药的密度和爆轰速度。利用 Laplace 变换法求解^[9],对控制方程(1)取关于 t 的 Laplace 变换:

$$\frac{\partial^2 u^*}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u^*}{\partial r} - \frac{u^*}{r^2} = \frac{p^2}{c_p^2} u^*. \quad (13)$$

其中: p 为拉普拉斯变换复参量; u^* 为 u 的拉普拉斯变换。设 $s = pr/c_p$,则方程转化为:

$$\frac{\partial^2 u^*}{\partial s^2} + \frac{1}{s} \frac{\partial u^*}{\partial s} - (1 + \frac{1}{s^2}) u^* = 0. \quad (14)$$

此式是修正的一阶贝塞尔方程,其通解为:

$$u^* = AI_1(s) + BK_1(s). \quad (15)$$

其中: $I_1(s), K_1(s)$ 分别为第一类的修正贝塞尔函数和第二类的修正贝塞尔函数; A 和 B 为系数。且有^[10]:

$$I_1(s) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{k! \Gamma(k+2)} \left(\frac{s}{2}\right)^{2k+1}; \quad (16)$$

$$K_1(s) = \lim_{\alpha \rightarrow 1} \frac{I_{-\alpha}(s) - I_{\alpha}(s)}{\sin \alpha \pi} \frac{\pi}{2}. \quad (17)$$

当 $\alpha \rightarrow 1$ 时, $K_1(s) \rightarrow \infty$,根据求解问题的性质, u^* 是有界的,所以 $B=0$ 。根据贝塞尔函数的渐近性质,有:

$$I_1(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi s}} e^s. \quad (18)$$

由式(9)可得:

$$u^* = \frac{A}{\sqrt{2\pi s}} e^s. \quad (19)$$

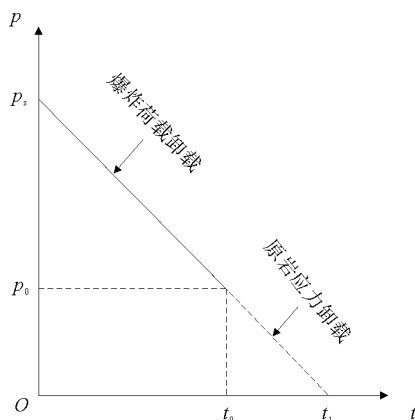


图 2 爆炸荷载和原岩应力卸载历程曲线图
Fig. 2 The unload curve of blasting load and initial stress versus time

对应力边界条件取 Laplace 变换,得:

$$[(\lambda + 2\mu)\frac{du^*}{dr} + \lambda\frac{u^*}{r}]_{r=a} = p^*(t) \quad (20)$$

从而得到积分常数 A,即:

$$A = \frac{2s_a p^*(t) c_p \sqrt{2\pi s_a}}{p e^{s_a} (2\lambda s_a + 4\mu s_a + \lambda - 2\mu)} \quad (21)$$

其中, s_a 为拉普拉斯变换后的边界条件。将 A 代入式(13),有:

$$u^* = \frac{2s_a p^*(t) c_p \sqrt{s_a}}{p (2\lambda s_a + 4\mu s_a + \lambda - 2\mu)} e^{s_a r} \quad (22)$$

由拉普拉斯卷积定理:

$$L[f_1(p) * f_2(p)] = F_1(p) * F_2(p) \quad (23)$$

考虑:

$$F_1(p) = p^*(t) e^{\frac{pr}{c_p}}; \quad (24)$$

$$F_2(p) = \frac{2a \sqrt{a} c_p}{(2\lambda a + 4\mu a + \lambda c_p - 2\mu c_p) e^{\frac{a}{c_p} \sqrt{r}} p^{\frac{3}{2}}} \quad (25)$$

可完成反演积分:

$$u = \frac{4c_p a \sqrt{at}}{\sqrt{\pi r} (2\lambda a + 4\mu a + \lambda c_p - 2\mu c_p) e^{\frac{a}{c_p} r}} \left[\frac{p_0 - p_s}{t_0} \left(t + \frac{r}{c_p} \right) \right] \quad (26)$$

根据位移与应力的关系,可得到径向应力表达式:

$$\sigma''_r = \frac{4c_p a \sqrt{at}}{\sqrt{\pi r} (2\lambda a + 4\mu a + \lambda c_p - 2\mu c_p) e^{\frac{a}{c_p} r}} \left[\frac{p_0 - p_s}{t_0 r} \left(t + \frac{r}{c_p} \right) \left(\frac{\lambda}{2} - \mu \right) + (\lambda + 2\mu) \frac{p_0 - p_s}{t_0 c_p} \right] \quad (27)$$

所以,总应力场 $\sigma_r = \sigma'_r + \sigma''_r, \sigma_\varphi = \sigma'_\varphi + \sigma''_\varphi$ 。扰动前后应力变化为 $\sigma_x = \sigma'_r - \sigma_r$,此值即为瞬态卸荷应力场。

4 瞬态卸荷引起的围岩破裂算例

巷道周边的瞬态卸荷类似于压应力波在自由表面反射造成的动态断裂(Hopkinson 断裂),称为剥落或层裂^[11]。层裂过程中,在第一层层裂出现的同时,也形成了新的自由表面,继续入射的压力脉冲将在此新的自由表面上反射,从而有可能造成第二次层裂,依次类推,在一定条件下会形成多层层裂,产生一系列裂片。

动态断裂准则是最大拉应力瞬时断裂准则,表述为 $\sigma_e \geq \sigma_d$,其中, σ_e 为净拉应力, σ_d 为岩石动态断裂强度。将应力波作用表示为时间的函数,则在距离自由面 δ 处形成的净拉应力是:

$$\sigma_e = \sigma(0) - \sigma \left(\frac{2\delta}{c_p} \right) \quad (28)$$

对三角形波,首次层裂的裂片厚度

$$\delta_1 = \frac{\lambda_0 \sigma_d}{2 \sigma_m} \quad (29)$$

其中, λ_0 为波长, σ_d 为应力波峰值。发生 n 次层裂的应力波峰值为:

$$n\sigma_d \leq |\sigma_m| < (n+1)\sigma_d \quad (30)$$

某深部圆形岩石巷道半径为 2.5 m,岩石为中硬砂岩,岩石的密度 2600 kg/m³,岩石拉梅常数分别为 $\lambda = 2.45 \times 10^4$ MPa, $\mu = 1.47 \times 10^4$ MPa,岩石静态抗拉强度为 12 MPa,岩石动态强度与静态强度比值取 2。炸药爆轰速度 3600 m/s,炸药的密度 1100 kg/m³,爆炸卸载总时间取 $t_0 = 2$ ms,原岩应力 $P_0 = 30$ MPa。图 3 为卸载到 1.5 ms 时不同径向距离的瞬态卸荷应力变化曲线。

可以看出,瞬态卸荷引起的破裂范围是 4.29 m,破裂层数约为 4。当原岩压力变为 15 MPa 时,瞬态卸荷引起的破裂范围是 5.09 m,可见原岩压力对破裂区大小影响是比较明显的。这些层会形成一长的薄片状岩层,在开挖扰动的作用下扩展贯通,最终形成岩爆破坏,岩体中储存的能量突然释放。因此,从某种意义上

讲,动态卸载扰动更易引起岩石裂纹的扩展,诱发岩爆灾害。

5 结束语

深部巷道围岩破裂现象是由于岩体开挖卸荷引起的围岩应力重分布的结果,深部巷道全断面钻爆开挖必须考虑瞬态卸荷的动力效应,所提出的积分变换推导的巷道开挖瞬间围岩径向应力场的动力学理论解可用于计算岩体爆破开挖诱发的围岩响应。需要说明的是,本文的计算过程对贝塞尔方程的通解作了渐进处理,计算结果与实际应有一定的差异,也不能反映出瞬态应力场的波动效应,描绘不出深部巷道围岩的分区破裂化现象,这都将是需进一步研究的问题。

参考文献:

- [1]周小平,钱七虎.深埋巷道分区破裂化机制[J].岩石力学与工程学报,2007,2(5):855-877.
Zhou Xiaoping, Qian Qihu. Zonal fracturing mechanism in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 2(5): 855-877.
- [2]李树忱.分区破裂化现象的现场观测分析与数值模拟[M].北京:中国科学技术出版社,2008:27-157.
- [3]潘一山,李英杰,唐鑫.岩石分区破裂化研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(1):3335-3341.
Pan Yishan, Li Yingjie, Tang Xin. Study on zonal disintegration of rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(1): 3335-3341.
- [4]严鹏,卢文波,陈明,等.隧洞开挖过程初始地应力动态卸载效应研究[J].岩土工程学报,2009,31(12):1888-1893.
Yan Peng, Lu Wenbo, Chen Ming, et al. Effect of initial geo-stress dynamic unloading during tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 31(12): 1888-1893.
- [5]陈建功,周陶陶,张永兴.深部洞室围岩分区破裂化的冲击破坏机制研究[J].岩土力学,2011,32(9):2629-2634.
Chen Jianguo, Zhou Taotao, Zhang Yongxing. Shock failure mechanism of zonal disintegration within surrounding rock in deep chamber[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(9): 2629-2634.
- [6]徐芝纶.弹性力学简明教程[M].3版.北京:高等教育出版社,2002:55-138.
- [7]刘喜武.弹性波场论基础[M].青岛:中国海洋出版社,2008:42-148.
- [8]卢文波,杨建华,陈明,等.深埋隧洞岩体开挖瞬态卸荷机制及等效数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1089-1096.
Lu Wenbo, Yang Jianhua, Chen Ming, et al. Mechanism and equivalent numerical simulation of transient release of excavation load for deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1089-1096.
- [9]张庆元,战人瑞.爆轰荷载作用下球形空腔的动力响应[J].爆炸与冲击,1994,14(2):182-185.
Zhang Qingyuan, Zhan Renrui. Explosion loading dynamic response of spherical cavity[J]. Explosion and Shock Waves, 1994, 14(2): 182-185.
- [10]王元明.数学物理方程与特殊函数[M].北京:高等教育出版社,2004:30-168.
- [11]王礼立.应力波基础[M].北京:国防工业出版社,2005:43-89.

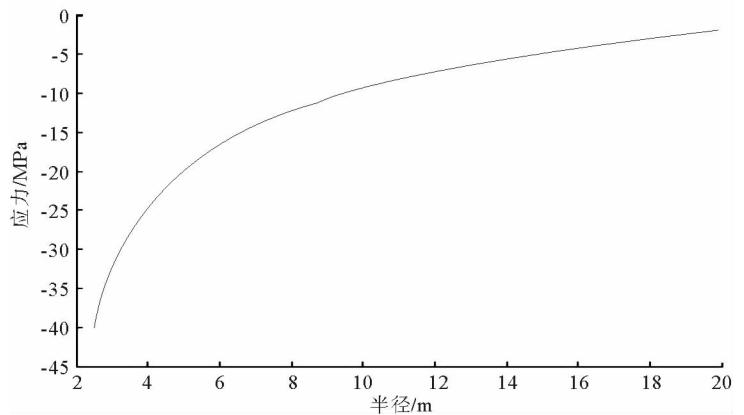


图 3 卸载到 1.5 ms 时不同径向距离的瞬态卸荷应力变化曲线图

Fig. 3 The instantaneous unloading curve of stress at different radial distance when uninstal to 1.5 ms