

深部隧洞掘进开挖瞬时卸荷动态破坏研究

王智, 施毅

(中煤科工集团重庆设计研究院有限公司, 重庆 400016)

摘要:瞬时卸荷是岩体开挖形成的瞬时岩体应力释放和调整。针对高应力区隧洞岩体开挖瞬时卸荷过程, 通过能量守恒推导出了瞬时卸荷位移公式; 基于 Kachanov 准则对构件的脆性破坏理论推导出隧洞侧壁围岩卸荷的初始破裂时间和完全破裂时间, 并得出完全破裂时间等于岩体开挖卸荷完成时间; 通过锦屏二级水电站某隧洞瞬时卸荷分析得出岩体在开挖瞬时卸荷条件下会产生岩爆, 并且卸荷岩体的初始破裂时间较完全破裂时间短, 但破裂却已很明显。

关键词:隧道工程; 卸荷位移; 破裂时间; 隧洞岩体

中图分类号: U456; TV554; P642.2 文献标识码: A 文章编号: 1672 - 7428(2015)11 - 0080 - 05

Study on Dynamic Failure by Instantaneous Unloading under Tunneling Excavation in Deep Tunnel/WANG Zhi, SHI Yi (CCTEG Chongqing Engineering Co., Ltd., Chongqing 400016, China)

Abstract: Instantaneous unloading is instantaneous rock mass stress release and adjustment caused by rock mass excavation. According to the instantaneous unloading process of tunnel rock mass excavation in high stress zone, the instantaneous unloading displacement formula was deduced through the energy conservation; the initial fracture and the complete rupture time of tunnel wall rock mass unloading were deduced based on brittle failure theory of Kachanov criterion, and it was obtained that the complete rupture time is equal to the completion time of rock mass excavation unloading. By the analysis on the instantaneous unloading of a tunnel in Jinping II hydropower station, it was concluded that rock blasting would be caused under instantaneous excavation unloading conditions and the initial fracture time was shorter than the complete rupture time, but the fracture has been very clear at that time.

Key words: tunnel engineering; unloading displacement; fracture time; tunnel rock mass

0 引言

中国是世界上隧道和地下工程最多、发展速度最快、地质及结构形式最复杂的国家^[1], 截止 2010 年底, 全国有公路隧道 7384 处, 总长 5122.6 km, 其中特长隧道 265 处, 共 1138 km, 长隧道 1218 处, 共 2020.8 km^[2]。公路隧道开挖必定会有一部分经过高应力区, 而工程开挖实际是一个卸荷过程, 岩体卸荷过程中会产生卸荷变形, 变形经历弹性段、卸荷屈服段、峰后脆性段及残余理想段 4 个阶段^[3]。瞬时变形在弹性变形之前, 是岩体开挖应力释放后瞬间产生的变形, 与岩体性质、岩体初始应力场、地下水、岩体构造等有关, 是一种非线性变形。变形伴随岩体的张裂, 一般变形量较小, 但对于高应力区的硬质岩体, 瞬时变形有可能引发岩爆。对于高应力区岩体开挖瞬时卸荷机制国内外十分关注, M. G. Abuov 等^[4]研究发现, 掌子面上的岩体爆破开挖产生的岩

体应力快速释放会导致洞室围岩破坏; M. MA^[5] 等通过现场检测发现, 地下岩体开挖卸荷是一个连续积累变位的过程, 认为在开挖设计时应考虑岩层重复动态加载因素; Tan Tjong Kie^[6] 通过分析得出岩体开挖卸荷稳定性与累积弹性势能释放、重分布应力状态以及膨胀性的泥质体这 3 个因素密切相关; 伍法权^[7] 等通过对小湾水电站高应力区岩体卸荷破坏的特性研究得出, 地基基础卸荷破坏最长发生在 2 m 内, 最深可达 6 m, 对高应力区的工程建设具有实际指导意义; 黄润秋等^[3] 基于岩石试件的卸荷试验, 得到了卸荷条件下岩石的应力 - 应变全过程曲线和破裂特征, 对卸荷过程的假设具有指导意义; 易长平等^[8] 提出了边坡地下洞室开挖施工过程中岩体初始应力动态卸荷的概念; 董辉等^[9] 以长沙市浏阳河隧道工程为例, 分别选择三台阶钻爆开挖与机铣挖 - 控制爆破相结合开挖两种施工方法开挖隧

收稿日期: 2015 - 04 - 08; 修回日期: 2015 - 09 - 08

作者简介: 王智, 男, 汉族, 1987 年生, 工程师, 硕士, 主要从事岩土工程方面的研究工作, 重庆市渝中区大坪(虎头岩)经纬大道 780 号, z1402101750@163.com。

道对卸荷过程的瞬态特性及动力效应进行了研究,对浅埋水下隧道的开挖具有良好的实用价值;卢文波等^[10-11]提出了岩体爆破开挖过程中初始应力场的卸载是一动态过程的观点,并利用波动理论分析了岩体在初始应力场瞬态条件下的运动过程,扩展了岩体开挖卸荷研究方向;罗忆等^[12]详细分析了高地应力条件下地下厂房高边墙变形突变的形成机制,认为地应力动态卸荷引发的围岩松动是导致地下厂房高边墙变形突变的重要原因之一。上述内容对岩体开挖的动力卸荷和破坏都做出了一定的研究,但侧重于动态过程和动力影响因素分析,对于卸荷岩体破裂时间较少涉及,笔者通过对隧洞开挖岩体卸荷过程进行分析,基于 Kachanov 动态破裂准则对高应力区隧洞开挖岩体破裂时间进行分析,为研究卸荷岩体在开挖过程中的变形破裂和损伤特性扩展了分析方向。

1 岩体开挖瞬态分析

开挖过程中开挖机械或爆炸冲击波使岩体破碎,岩体破碎后形成洞室临空面,此临空面突然失去支撑而产生卸荷,同时作用于岩体的荷载不断发生变化,洞室岩体在荷载作用下产生变形,荷载及变形过程实际上是一个动态过程^[8]。卸荷作用还将引起卸荷面附近岩体内部应力重分布,造成局部应力集中效应。在卸荷回弹变形过程中,因差异回弹面的存在在岩体内形成一个被约束的残余应力体系,此残余应力会继续对围岩进行作用使围岩发生变形。

岩体瞬时卸荷过程在很短时间内即完成,但瞬时卸荷过程伴随荷载和变形的变化,是一个动态过程,为便于研究,将瞬态卸荷考虑为拟静态过程^[10]。因此,假定卸荷荷载随时间线性变化^[11],如图 1 所示。图 2 中 t_u 为卸荷时间,可根据现场检测得到,当检测变形速度为初始稳定值 v_1 时的时间,即为卸荷时间。

卸荷过程实际上就是岩体发生位移的过程,在平面上取围岩洞室一侧侧长为 L 、高为 1 的岩块,如图 3 所示,岩体瞬时卸荷刚开始时相当于在此围岩块上施加了一个“拉应力” P_0 ,即围岩初始应力,此时岩块有最大加速度 a_{\max} ,岩体由于“受拉”而发生加速运动,与此同时,岩块本身的“拉应力”起作用,在卸荷荷载减小的情况下做加速度减小的加速运动,

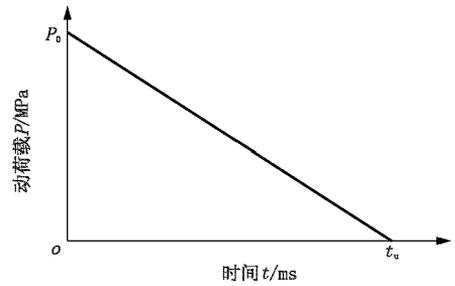


图 1 岩体卸荷荷载随时间变化

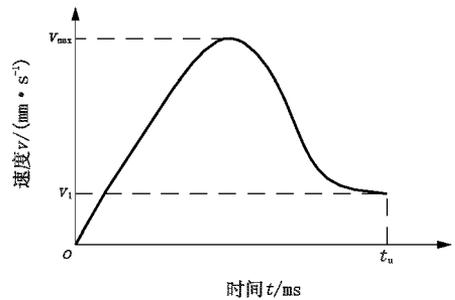


图 2 岩块卸荷速度变化曲线

卸荷荷载小于岩块本身的“拉应力”时,岩体减速运动,直至卸荷荷载变为 0,而此时岩体的加速度 $a = 0$,作速度 $v = v_1$ 的弹性运动。

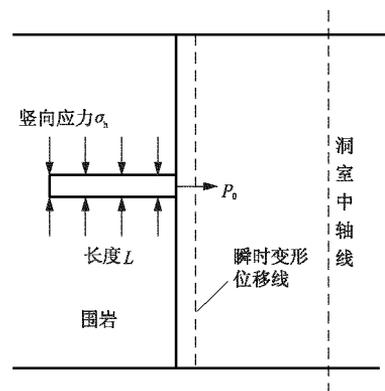


图 3 瞬时卸荷模型

由上述过程可知,岩体瞬时卸荷最大位移为 $P_0 L / E$ 。

由能量守恒得:

$$\frac{1}{2} P_0 \frac{P_0 L}{E} = 2\sigma_h L f u + \frac{1}{2} P_0 u + \frac{1}{2} \rho L v_1^2 \quad (1)$$

整理得:

$$u = \frac{P_0^2 L - E \rho L v_1^2}{E(4\sigma_h L f + P_0)} \quad (2)$$

式中: u ——岩块瞬时变形位移, mm; P_0 ——初始水平应力, MPa; ρ ——卸荷围岩的密度, kg/m^3 ; f ——

岩块与上覆和下覆围岩的摩擦系数; σ_h ——上覆和下覆围岩对岩块的作用力,MPa; E ——岩块弹性模量,GPa。

2 卸荷岩体动力断裂准则

隧洞围岩在卸荷作用下不仅会发生瞬时变形,当围岩初始应力较大时,还有可能产生拉裂。如图4所示,卸荷岩体受上覆应力 σ_h 和动荷载 P_0 作用,在不考虑动荷载 P_0 情况下岩体受单向应力作用,若发生破裂,裂面近似平行于竖向应力,与卸荷荷载 P_0 垂直,相当于在拉裂面垂直方向上又施加了一个拉应力,势必会加速拉裂面的形成。由于岩体经典强度理论适用于静力条件下岩石的破坏分析,在动荷载作用下岩石破坏分析难以成立,因此本文采用Kachanov脆性构件破坏准则。

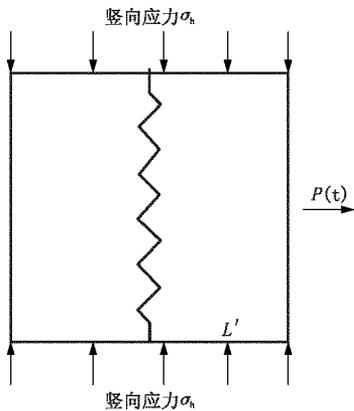


图4 垂直于洞壁方向围岩受力及拉裂面示意图

Kachanov对构件的脆性破坏理论认为:通过引进一个连续性因子 ψ 来描述材料的损伤状态,初始损伤时, $\psi = 1$;发生脆性破坏时, $\psi = 0$,并提出演变方程:

$$\frac{d\psi}{dt} = -a \left(\frac{\sigma_m}{\psi} \right)^m \quad (3)$$

式中: a 、 m ——材料参数,其中 $a > 0$, $m \geq 0$; σ_m ——拉伸应力。

在卸荷过程中某一时刻 $t = t_i$,如果围岩中的某一点发生破坏 $\psi = 0$,随后就会在物体中形成两个区域,如图5所示,在 V_1 区, $\psi > 0$;在破坏前沿 Σ , $\psi = 0$ 。

由于在破坏前沿面 Σ 上, $\psi = 0$, $d\psi/dt$,对式(3)积分得:

$$1 - \psi^{m+1} = a(m+1) \int_0^t \sigma^m(\tau) d\tau \quad (4)$$

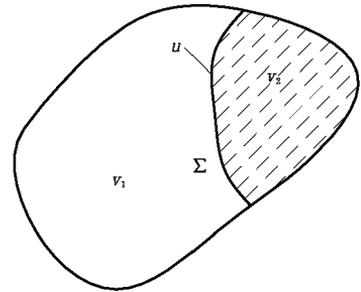


图5 破坏前沿和未破坏区域模型示意图

对于非均匀应力场,应力为时间和空间的函数,由于破坏前沿 $\psi = 0$,故:

$$a(m+1) \int_0^t \sigma^m(u, \tau) d\tau = 1 \quad (5)$$

式中: u 、 τ ——引入变量。

3 岩体卸荷损伤破裂时间

由Kachanov破裂准则知:初始损伤时,应力连续性因子 $\psi = 1$,岩体不受动荷载影响,破裂时间 $t = 0$;岩体产生损伤时,连续性因子 $0 < \psi < 1$,随着动力强度增大损伤程度增大,破裂时间 $t = 0$;发生脆性破坏时,连续性因子 $\psi = 0$,岩体逐步破裂掉落,损伤破裂时间 $t \leq t_u$ 。

3.1 初始潜在破裂时间计算

对于模型示意图6,初始破坏区为 2δ ,影响深度为 h ,在拉伸区,即 $y_0 > 0$,连续性因子 ψ 可由式(3)确定;而在压缩区,即 $y_0 < 0$,根据最大拉应力准则不会发生破坏,故 $\psi = 1$ 。

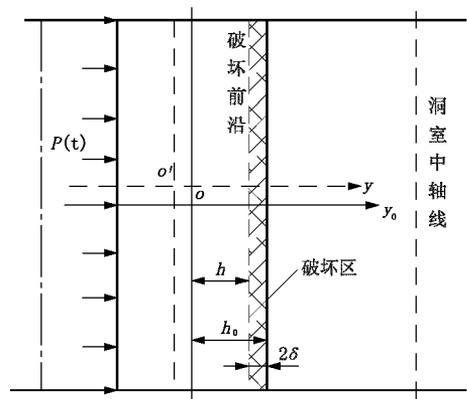


图6 地下洞室围岩卸荷模型示意图

初始破裂条件为:

$$\sigma_m = \sigma(t) = \frac{M_0 y_0}{I_{n0}} \quad (6)$$

由图1可知动荷载是线性变化的,则洞壁中点

处弯矩为:

$$M_0 = \frac{P_0 l^3 (t_u - t)}{8t_u} \quad (7)$$

式中: y_0 ——洞壁初始破裂深度, m; I_{n0} ——惯性矩, m^4 ; $\sigma(t)$ ——动拉伸应力, MPa; l ——洞室高度, m; M_0 ——洞壁中点处弯矩, $kN \cdot m$; t ——动荷载作用时间, ms。

当 $t = t_1$ 时, 将 $y_0 = h_0$ 、式(6)、式(7) 带入式(3), 并有条件 $t = 0$ 时, $\psi = 1$, 令 $m = 1$, 得到初始潜在破裂时间:

$$t_1 = \frac{t_u \pm \sqrt{t_u^2 - \frac{t_u h_0^2}{6al^3 P_0}}}{2} \quad (8)$$

若 $t_u < \frac{h_0^2}{6al^3 P_0}$, 则无解, 卸荷岩体不产生破坏。

若 $t_u \geq \frac{h_0^2}{6al^3 P_0}$, 则分两种情况:

(1) 当 $t_1 = \frac{t_u + \sqrt{t_u^2 - \frac{t_u h_0^2}{6al^3 P_0}}}{2}$ 时, t_1 随 h_0 的增大而减小, 与实际不符, 舍去;

(2) 当 $t_1 = \frac{t_u - \sqrt{t_u^2 - \frac{t_u h_0^2}{6al^3 P_0}}}{2}$ 时, 卸荷完成前破裂已开始。

3.2 卸荷岩体破坏时间计算

对于初始破裂时间 $t_1 = \frac{t_u - \sqrt{t_u^2 - \frac{t_u h_0^2}{6al^3 P_0}}}{2}$, 在卸荷未完成时就发生了破裂, 假设岩体卸荷破裂厚度为 h , 初始破坏厚度为 2δ , 如图 5 所示, 围岩侧墙受随时间变化的 $P(t)$ 作用, 取中心点为研究对象, 则中心点处的最大拉应力为:

$$\sigma(t) = \frac{M(t)}{I_n(\tau)} y(\tau) \quad (9)$$

式中, 惯性矩 $I_n(\tau) = \frac{h^3(\tau)}{12}$, 弯矩 $M(t) = \frac{P_0 l^3 (t_u - t)}{8t_u}$ 。

将式(9)代入式(5)得:

$$a(m+1) \int_0^t \frac{M^m(t) y^m(\tau)}{I_n^m(\tau)} d\tau = 1 \quad (10)$$

令 $m = 1$ 得:

$$2a \int_0^t \frac{M(\tau) y(\tau)}{I_n(\tau)} d\tau = 1 \quad (11)$$

由卸荷破坏过程边界条件得:

$$y(\tau) = y_0 + h_0 - h(\tau) \quad (12)$$

$$y(t) = h(t) \quad (13)$$

故:

$$y_0 + h_0 = 2h(t) \quad (14)$$

$$y(\tau) = 2h(t) - h(\tau) \quad (15)$$

代入式(11)得:

$$3a \frac{P_0 l (t_u - t)}{t_u} \int_0^t \frac{2h(t) - h(\tau)}{h^3(\tau)} d\tau = 1 \quad (16)$$

整理得:

$$\int_0^t \frac{2h(t) - h(\tau)}{h^3(\tau)} d\tau = \frac{t_u}{3aP_0 l^3 (t_u - t)} \quad (17)$$

对式(17)中的时间 t 进行 2 次求导得:

$$-\frac{h''}{h^2(t)} = \frac{6t_u}{aP_0 l (t_u - t)^3} h' - \frac{3t_u}{aP_0 l (t_u - t)^2} h'' \quad (18)$$

求微分得时间 t 与 h 之间的关系式:

$$h(t) = c(t - t_u) e^{\frac{1}{t-t_u}} \int_1^{\frac{1}{t-t_u}} \frac{1}{u} e^{-\frac{1}{u}} du \quad (19)$$

令 $f(t - t_u) = (t - t_u) e^{\frac{1}{t-t_u}} \int_1^{\frac{1}{t-t_u}} \frac{1}{u} e^{-\frac{1}{u}} du$, 由于 $t = t_1$ 时 $h = h_0$, 所以:

$$c = \frac{h_0}{f(t_1 - t_u)} \quad (20)$$

将式(18)代入式(17)得 h 随时间 t 变化的公式:

$$h(t) = h_0 \frac{f(t - t_u)}{f(t_1 - t_u)} \quad (21)$$

图 6 中的侧墙完全破坏时对应于 $h = 0$, 将其代入式(19), 由式(19)可以看出除 $(t - t_u)$, 其他的多项式都大于 0, 则可得到相应的破坏时间 t 为卸荷荷载作用时间或卸荷完成时间 t_u , 即:

$$t = t_u \quad (22)$$

由上式可知, 卸荷过程伴随整个破裂过程, 既卸荷完成时破裂随即完成。

4 基于岩爆实例分析

本文实例采用文献[14]锦屏二级水电站施工中引发的排水洞岩爆数据。锦屏二级水电站地处青

藏高原向四川盆地过渡的地貌斜坡地带,由首部低闸、引水隧洞和地下厂房3大部分组成,电站利用雅砻江150 m大河湾的巨大天然落差截弯取直,开挖隧洞引水发电。工程区上覆岩体一般埋深1.5~2 km,最大埋深达2.525 km,整个区域处于高应力区,工程区内钻孔有岩心饼化现象。隧洞出露区地层为三叠系下统(T_1)、中统(T_2)、上统(T_3)的部分地层,主要有细砂岩、中砂岩、粗砂岩、板岩、大理岩、细晶灰岩、泥质灰岩、条带状云母大理岩、角砾状大理岩、绿泥石片等地层,其中某一隧洞为厚层大理岩,参数为: $E=33.0\text{ GPa}$; $c=1.1\text{ MPa}$;泊松比 $\nu=0.21$; $\gamma=27.0\text{ kN/m}^3$;内摩擦角 $\varphi=52^\circ$;抗拉强度 $\sigma_t=3.7\text{ MPa}$;最大主应力 $\sigma_1=48\text{ MPa}$;最小主应力 $\sigma_3=38.4\text{ MPa}$ 。

设隧洞侧墙影响深度 $L=h_0=2.5\text{ m}$,洞室高 $l=5\text{ m}$,瞬时卸荷时间 $t_u=5.3\text{ ms}^{[11]}$,初始速度稳定值 $v_1=0.002\text{ mm/s}$,初始水平应力 $P_0=\sigma=38.4\text{ MPa}$,初始竖向应力 $\sigma_n=\sigma_1=48.0\text{ MPa}$,如图7所示,取洞室侧壁中点计算分析。

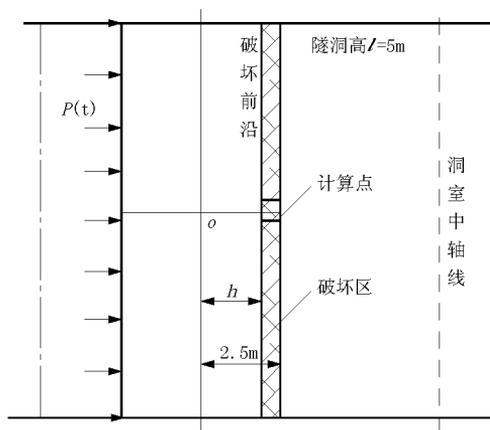


图7 锦屏二级某隧洞模型计算简图

由式(2)计算得瞬时变形位移 $u=0.401 \times 10^{-3}\text{ mm}$ 。

令 $\alpha=m=1$,计算 $h=h_0=2.5\text{ m}$ 得到初始破裂时间 $t_1=5.425 \times 10^{-5}\text{ ms}$,由此可知,岩体发生破裂产生岩爆时间远远小于 5.3 ms ,从图2可以看出,此时变形破裂处于初始加速阶段,变形加速较快,即在很短的时间内变形破裂已很明显;由式(22)计算得到卸荷破坏完成时间 $t=t_u=5.3\text{ ms}$,卸荷过程伴随围岩破坏的始终。

5 结论

(1)高应力区隧洞岩体开挖瞬时变形是一动态过程,在拟静态条件下通过能量守恒推导了瞬时变形位移公式;基于Kachanov对构件的脆性破坏理论给出了卸荷围岩初始破裂时间和完全破裂时间计算方法。

(2)锦屏二级水电站隧洞地属高应力区,瞬时卸荷将导致岩体破裂,初始破裂时间为 $5.425 \times 10^{-5}\text{ ms}$,卸荷破坏完成时间为 5.3 ms ,初始破裂时间相对整个破裂过程较短,但变形破裂已形成,因此,隧洞围岩破坏伴随于岩体开挖卸荷整个过程。

参考文献:

- [1] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 351-364.
- [2] 叶飞, 姜同虎, 张金龙, 等. 山岭公路隧道施工技术综合分析[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(10): 22-29.
- [3] 黄润秋, 黄达. 卸荷条件下岩石变形特征及本构模型研究[J]. 地球科学进展, 2008, 23(5): 441-446.
- [4] M G Abuov, Sh M Aitaliev, T M Ermekov, N B Zhanbyrbaev, and M A Kayupov. Studies of the Effect of Dynamic Processes During Explosive Break-out Upon the Roof of Mining Excavations [J]. Soviet Mining Science, 1989, (6): 581-590.
- [5] M MA and B H BRADY. Analysis of the Dynamic Performance of an Underground Excavation in Jointed Rock Under Repeated Seismic Loading [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 1999, (17): 1-20.
- [6] Tan Tjong Kie. Importance Consequences of Stress Release in the Stability of Excavations [J]. Chinese Journal of Rock Mech. and Engng, 1995, 14(S1): 385-393.
- [7] Faquan Wu, Tong Lin, Jiang Liu and Xiong Liang. Excavation Unloading Destruction Phenomena in Rock Dam Foundation [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2009, 68(2): 257-262.
- [8] 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研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(S1): 4750-4754.
- [9] 董辉, 侯俊敏, 陈家博, 等. 堤下隧道开挖施工瞬态卸荷分析[J]. 水电能源科学, 2011, 29(9): 119-122.
- [10] 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(1): 4653-4657.
- [11] 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): 2184-2188.
- [12] 罗忆, 卢文波, 周创兵, 等. 高地应力条件下地下厂房开挖动态卸荷引起的变形突变机制[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1553-1560.
- [13] 王军. 损伤力学的理论与应用[M]. 科学出版社, 1997.
- [14] 刘立鹏, 汪小刚, 贾志欣, 等. 锦屏二级水电站施工排水洞岩爆机理及特征分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(10): 3150-3156.