

文章编号: 1000-7598(2013)12-3580-07

地下洞室开挖过程围岩应变能调整力学机制

范勇^{1,2}, 卢文波^{1,2}, 严鹏^{1,2}, 陈明^{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: 深埋洞室岩体开挖过程中, 围岩应变能的聚集和释放是洞室发生灾变破坏的重要诱因。针对圆形洞室开挖, 分析和比较初始地应力准静态和动态两种不同卸载方式下围岩应变能的调整过程, 基于能量角度判定了围岩损伤范围。研究表明: 伴随地下洞室的开挖, 岩体能量靠径向应力做功的方式在围岩中由远及近传递, 并导致近区围岩应变能聚集; 初始地应力动态卸载诱发围岩应变能先减小后增大, 先对靠近开挖面的相邻岩体通过径向应力做功的方式释放自身的应变能, 随着卸载应力波的继续向前传播, 远离开挖面的相邻岩体又通过径向应力对其做功的方式促使其应变能聚集; 相比初始地应力准静态卸载, 动态卸载条件下高应变能聚集程度导致围岩损伤破坏范围更大。

关键词: 准静态卸载; 动态卸载; 应变能聚集; 损伤

中图分类号: O 383.1; TV 554

文献标识码: A

Mechanism of strain energy adjustment of surrounding rock during excavation of underground caverns

FAN Yong^{1,2}, LU Wen-bo^{1,2}, YAN Peng^{1,2}, CHEN Ming^{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: During the excavation of deep caverns, the strain energy accumulation and release of surrounding rock are the most important incentives to cause the catastrophe damage. Aiming at the excavation of circular tunnel, the energy transient adjustment process of surrounding rock under the different unloading ways of initial in-situ stress (static and dynamic unloading) is analysed and compared, and based on energy point of view the damage scale of surrounding rock is calculated. The results show that, energy transmits from far and near in the surrounding rock by the radial stress working under the unloading of initial in-situ stress, and causes the strain energy of the near parts of surrounding rock gathering, with the excavation of underground caverns and tunnels. The strain energy of the near parts of surrounding rock decreases firstly and then increases, this caused by the dynamic unloading of initial in-situ stress; firstly the rock releases its own strain energy by radial stress working on the adjacent rock mass near the excavation surface, with the continuous transmission of the unloading stress wave, its own strain energy gathers by the working of adjacent rock mass away from the excavation surface. Comparing with the static unloading of initial in-situ stress, the high strain energy accumulation degree caused by the dynamic unloading of initial in-situ stress leads the larger extent of damage zone.

Key words: quasi-static unloading; dynamic unloading; strain energy accumulation; damage

1 引言

随着我国西部大开发战略的进一步实施, 处在西北、西南崇山峻岭地区的一批大型、特大型水电工程已进入兴建期, 其中如溪洛渡、拉西瓦、瀑布沟、小湾、锦屏一级与二级等多数水电工程均涉及到大型地下洞室群的开挖, 埋深大、地应力高的工

程问题突出。在大埋深、高地应力环境中, 坚硬脆性岩体往往储存较高的应变能, 成为高储能岩体^[1]。高储能岩体的开挖将导致开挖面上的初始地应力卸载, 进而使围岩应力状态发生变化, 实质上亦即原岩中已积聚的弹性应变能的转移、聚集、耗散和释放的过程。伴随围岩应变能的耗散与释放, 岩体赋存的环境发生变化、物理力学性质发生劣化, 并最

收稿日期: 2012-10-18

基金项目: 国家 973 计划项目(No. 2010CB732003); 国家自然科学基金项目(No.51125037, No.51179138); 高等学校博士点基金资助项目(No.20110141110026)。

第一作者简介: 范勇, 男, 1988 年生, 博士研究生, 主要从事岩石动力学及工程爆破方面的研究工作。E-mail: yfan@whu.edu.cn

通讯作者: 卢文波, 男, 1968 年生, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩石动力学方面的研究工作。E-mail: wblu@whu.edu.cn

终导致围岩开挖损伤区的形成，同时还有可能诱发各种地质灾害（如岩爆、突发大变形等）^[2-3]。因此，分析高储能岩体开挖过程中围岩应变能的转移、聚集和释放及其对损伤孕育的影响，对于深埋洞室开挖围岩稳定性研究和评估具有重要意义。

国内外学者的研究成果表明：高地应力条件下深埋洞室爆破开挖过程中，岩体开挖荷载的瞬态释放会产生强烈的动力效应，如可在围岩中诱发振动，导致岩体开挖松动，引起围岩应变能聚集和释放等现象^[4-7]。而目前，基于能量聚集、耗散和释放角度对深部岩体开挖引起的变形、损伤、破坏等方面的研究主要采用的是静力学方法^[8-11]，忽略了岩体爆破开挖过程中，初始地应力动态卸载所诱发的一系列动力效应及其对围岩应变能调整的影响。

本文针对具有典型代表性的静水应力场圆形洞室开挖，从理论上计算分析了准静态卸载和动态卸载方式下围岩应变能的传递、转移和聚集过程，采用基于可释放应变能的岩体损伤破坏准则，计算了两种不同卸载方式下的围岩损伤破坏范围。

2 力学模型

静水应力场条件下，在原岩中开挖一条半径为 a 的圆形无限长隧洞，属平面应变问题。假设应力值为 P_0 ，而且岩体处于弹性变形阶段，围岩应力、位移可直接引用平面应变轴对称结果，即

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 = \sigma_\theta &= P_0 \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) \\ \sigma_2 &= P_0 \\ \sigma_3 = \sigma_r &= P_0 \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$u_r = \frac{(1+\nu)P_0}{E_0} \cdot \frac{a^2}{r} \quad (r \geq a) \quad (2)$$

式中： σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为开挖后围岩第 2、第 2、第 3 主应力； σ_r 、 σ_θ 分别为开挖后围岩弹性区的径向正应力、环向正应力； u_r 为半径 r 处岩体发生的径向位移； E_0 、 ν 分别为岩体弹性模量及泊松比。开挖后在开挖面上产生位移 u_a ，如图 1 所示。

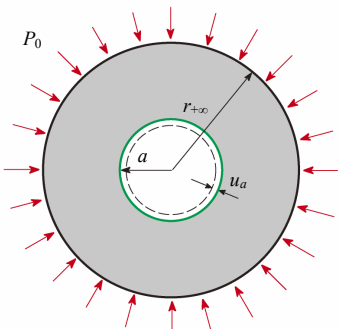


图 1 圆形洞室开挖分析模型
Fig.1 Analysis model of circular tunnel excavation

$$U = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_1\sigma_3)]/2E_0 \quad (3)$$

易得开挖前原岩应变能密度 U_y 为

$$U_y = P_0^2[3(1-2\nu)]/2E_0 \quad (4)$$

将式 (1) 代入式 (3)，可求得开挖后围岩弹性应变能密度 U_w 为

$$U_w = P_0^2[3(1-2\nu) + 2(1+\nu)a^4/r^4]/2E_0 \quad (5)$$

开挖后，围岩应变能密度增量 ΔU 为

$$\Delta U = U_w - U_y = P_0^2[(1+\nu)a^4/r^4]/E_0 \quad (6)$$

图 2 为开挖后围岩应变能密度与原岩应变能密度比值随径向相对距离变化曲线。可以看出，开挖后近区围岩($1 \leq r/a \leq 3.5$)应变能聚集。

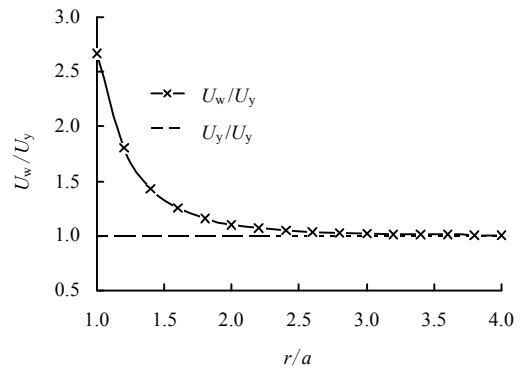


图 2 围岩应变能密度随距离变化曲线
Fig.2 Variation curves of strain energy's density vs. distance

3 准静态卸载过程

伴随着开挖轮廓面的形成，开挖面上的径向应力 $P(t)$ 由 P_0 逐渐衰减到 0，线性衰减曲线如图 3 所示。当 t_s 较大时，地应力以非常小的速度缓慢卸载，近似于准静态卸载。

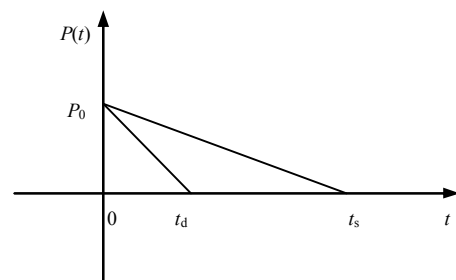


图 3 地应力卸载时程曲线
Fig.3 In-situ stress unloading curves vs. time

$0 \sim t_s$, 准静态开挖, 开挖完成后, 半径为 a 的开挖面上发生位移 u_a , 未卸应力做的总功 W_1 (负功) 为

$$W_1 = -\frac{1}{2} P_0 \cdot 2\pi a u_a = -\frac{\pi(1+\nu)}{E_0} a^2 P_0^2 \quad (7)$$

远处围岩 (假定半径 r 很大, 设为 $r_{+\infty}$) 对近区围岩所做的功 W_2 (正功) 为

$$W_2 = P_0 \cdot 2\pi r_{+\infty} u_{+\infty} = \frac{2\pi(1+\nu)}{E_0} a^2 P_0^2 \quad (8)$$

由式 (6) 可以看出, 开挖后围岩应变能聚集, 聚集的应变能 J 为

$$J = \int_a^{+\infty} \Delta U \cdot 2\pi r dr = \frac{\pi(1+\nu)}{E_0} a^2 P_0^2 \quad (9)$$

结合式 (7)~(9) 不难看出, $W_1 + W_2 = J$, 完全遵守能量守恒定律。

因此, 对于准静态开挖, 围岩应变能增大, 较远处深部围岩通过对近区围岩做功的形式释放自身的应变能, 这是近区围岩应变能增大的能量来源。半径为 $r_{+\infty}$ 的岩体体积趋向于无穷大, 所以深部围岩单位体积岩体只用释放极小的 (趋于无穷小) 应变能就能使近区围岩应变能增大 J 。

4 动态卸载过程

深埋隧洞钻爆开挖时, 裂纹首先在炮孔连线方向优先扩展, 相邻炮孔在极短时间内相互贯通。伴随着岩体的开裂破碎及运动抛掷, 开挖面上的围岩应力快速释放, 这一卸载扰动以弹性波的形式向岩体内传播, 在围岩中激发动应力, 其动力效应与应力水平、开挖面尺寸和应力释放时间有关。

根据开挖边界上的应力连续条件, 只有在裂纹贯穿、炮孔压力衰减至低于初始地应力时, 宏观上的地应力卸载在开挖轮廓面上发生。对于深埋圆形隧洞全断面爆破开挖, 一般采用爆速为 3 500~4 500 m/s 的 2[#]岩石硝铵炸药或乳化炸药, 采用孔间距为 0.8~1.2 m、钻孔直径为 42 mm、孔深为 1.5~5.0 m 的浅孔爆破。若隧洞远场地应力较高, 达到 20~50 MPa, 根据文献[12]的研究成果, 地应力释放持续时间为 2~5 ms, 这是一个典型的瞬态力学过程。

4.1 求解运动方程

如图 4 所示, 开挖面上的径向应力 $P(t)$ 由 P_0 经过时间 $t_0 = 2$ ms 迅速线性衰减到 0, 假设由地应力卸载诱发扰动的传播速度为 C_p , s 为岩体离开开挖面

的距离, t_0 小到与 s/C_p 一个数量级或者更小时, 围岩中卸载波传播引起的动态效应是必须考虑的。

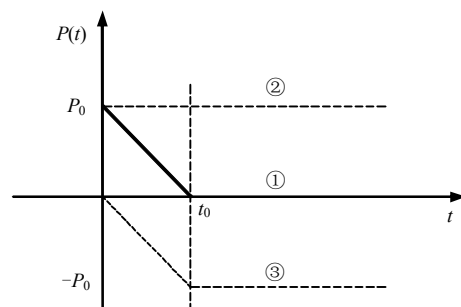


图 4 厚壁圆筒内压力-时间动态卸载曲线
Fig.4 Pressure dynamic unloading curves of thick-walled cylinder vs. time

为便于计算, 将开挖边界上地应力的卸载过程 (如图 4 中折线①) 分解为爆区的初始应力状态 (直线段②) 和动态拉荷载曲线③的叠加。经过处理后, 图 4 所示的动态卸载问题可归结为半径为 a 的柱腔激发问题: 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, 有一随时间变化的拉力作用在腔壁上。

规定压力为正, 拉力为负, 在柱坐标系下, 该问题中弹性波的控制方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{u}{r^2} &= \frac{1}{C_p^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \sigma_r(r, t) &= (\lambda + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial r} + \lambda \frac{u}{r} \\ \sigma_\theta(r, t) &= \lambda \frac{\partial u}{\partial r} + (\lambda + 2\mu) \frac{u}{r} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: λ 、 μ 为拉梅常数; $\sigma_r(r, t)$ 、 $\sigma_\theta(r, t)$ 、 $u(r, t)$ 分别为动态卸载时围岩的径向正应力、环向正应力、径向位移; C_p 为介质的弹性纵波波速 (m/s), $C_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho}$, 取 4 500 m/s, ρ 为介质密度 (kg/m^3), 取 2 700 kg/m^3 。

初始条件、边界条件为

$$u(r, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = 0 \quad (r \geq a, t < 0) \quad (11)$$

$$[\sigma_r]_{r=a} = \begin{cases} 0 & (t \leq 0) \\ -\frac{P_0 t}{t_0} & (0 < t \leq t_0) \\ -P_0 & (t \geq t_0) \end{cases} \quad (12)$$

$$\lim_{r \rightarrow \infty} [u] = 0 \quad t > 0 \quad (13)$$

先将式 (10) 中的控制方程对时间 t 进行 Laplace 变换, 求出柱形空腔激发的动应力场的径向应力和

切向应力的 Laplace 空间解; 再采用 Miklowitz^[13] 提出的特殊的围道积分方法求出 Laplace 空间解的逆变换, 再迭加上初始地应力 P_0 就得到该动态卸载问题的解。为了体现岩体应力瞬态释放的力学效应, 将应力准静态释放作为对比, 取应力准静态释放持续时间 $t_s = 24 \text{ ms}$ (当然, 此值还可以取得更大)。

$t=0$ 时刻, 卸载应力波从半径为 $r=a$ 的开挖面上沿径向向围岩深部传播; 当 $t=a/C_p$ 时, 卸载应力波波阵面到达 $r=2a$ 处; 当 $t=2a/C_p$ 时, 卸载应力波波阵面到达 $r=3a$ 处。卸载应力波传播示意图如图 5 所示。

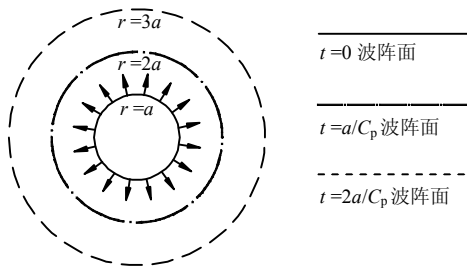
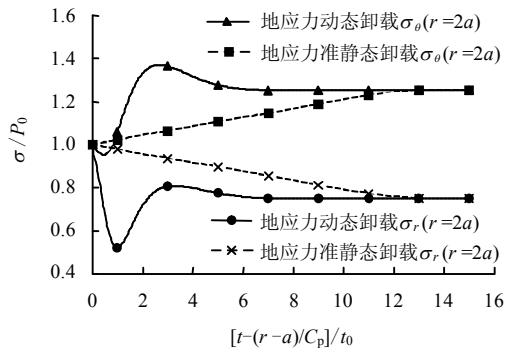


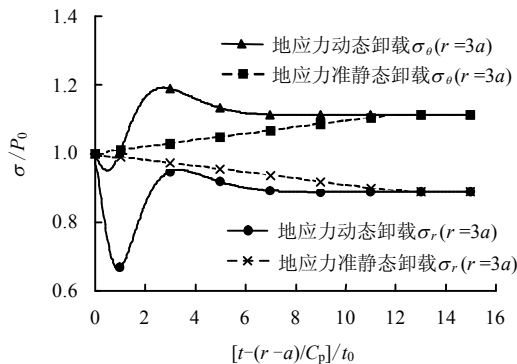
图 5 卸载应力波传播示意图

Fig.5 Sketch map of in-situ stress unloading wave

地应力动态卸载和准静态卸载时, 围岩中 $r=2a$ 和 $r=3a$ 处的径向和环向应力-时程曲线如图 6 所示。



(a) 2a 处径向和环向动态应力



(b) 3a 处径向和环向动态应力

图 6 初始地应力动态卸载应力场

Fig.6 Dynamic unloading field of initial in-situ stress

从图可以看到, 动态卸载过程中动应力在径向表现为快速卸荷回弹, 而在切向则出现动应力集中, 表现为加载; 圆形开挖边界附近岩体中的径向和切向应力都是先减小后增大, 最后都稳定于静态二次应力值。与地应力准静态卸载相比, 地应力动态卸载在围岩中产生了一个附加动应力, 导致围岩径向卸载和环向加载效应放大。

图 7 显示了半径为 $2a$ 和 $3a$ 处围岩应变能密度随时间变化曲线 ($U_w(t)$ 为动态围岩应变能密度)。 $t=a/C_p$ 时刻, 卸载应力波波阵面到达图 5 中 $r=2a$ 处, 半径为 $r=2a$ 处围岩静水应力场被打破, 应变能密度先减小后增大, 并最终稳定在静态卸载值; $t=2a/C_p$ 时刻, 卸载应力波波阵面到达图 5 中的 $r=3a$ 处, 随后该处径向、环向应力及其应变能密度将经历与 $r=2a$ 处围岩相似的动态调整过程, 差别在于地应力卸载所诱发的径向、环向应力及应变能密度动态调整幅值不同。

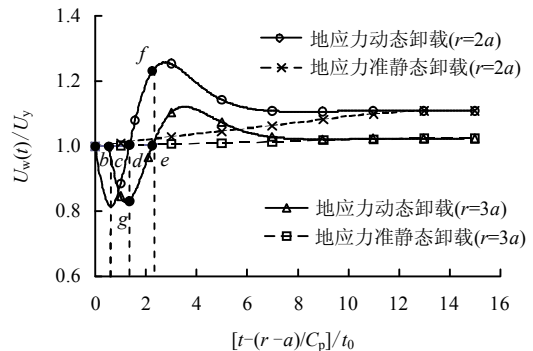


图 7 围岩应变能密度随时间变化曲线

Fig.7 Variation curves of strain energy's density of surrounding rock vs. time

由图 7 可以看出, 随着卸载应力波的向前传播, 从时间 $t_b \sim t_d$, 地应力动态卸载所诱发的半径 $r=2a$ 处围岩应变能密度低于原岩应变能密度, 释放能量, 而从时间 $t_d \sim t_f$, 半径 $r=2a$ 处围岩应变能密度增大, 超过原岩应变能密度, 吸收能量; 从时间 $t_g \sim t_e$ (与 $t_d \sim t_f$ 属于同一时间段), 地应力动态卸载所诱发的半径 $r=3a$ 处围岩应变能密度低于原岩应变能密度, 释放能量。

$2t_0$ 和 $3t_0$ 时刻, 围岩应变能密度随距离变化曲线如图 8 所示。

由图可以看出: 在 $t=2t_0$ 时刻, 卸载波波阵面到达 $r_f=4.6a$ 处, $r \geq 4.6a$ 处围岩应变能密度与原岩应变能密度相同; $a \leq r \leq r_h$ 处围岩应变能密度超过原岩应变能密度, 随着卸载波的继续向前传播, $t=3t_0$ 时刻, 其波阵面到达 $r_k=6.4a$ 处; $a \leq r \leq r_h$ 处围岩应

变能密度继续增大, 出现能量聚集现象, 这是因为 $r \geq r_h$ 处围岩向其输入能量的缘故。

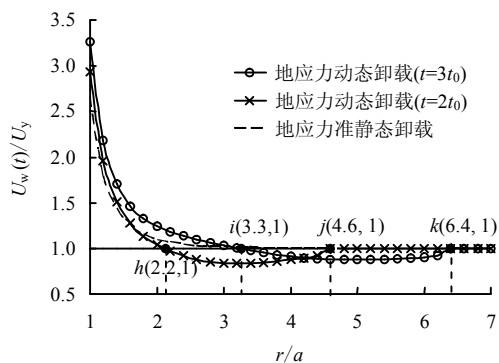


图8 围岩应变能密度随距离变化曲线
Fig.8 Variation curves of strain energy's density of surrounding rock vs. distance

因此, 伴随着开挖面上地应力的瞬态卸载, 对于半径为 r 处的围岩应变能密度先减小后增大, 在初始时间段, 通过对相邻半径小于 r 的围岩输入能量而促使自身应变能密度降低, 随着卸载应力波的继续向前传播, 相邻半径大于 r 的围岩又对其输入能量, 促使其应变能增大, 并且高于原岩应变能。这一围岩应变能先减小(释放)后增大(聚集)的现象由开挖面逐渐向围岩深部传递, 并且在传递过程中越来越不明显。

4.2 能量平衡

静水应力条件下, 平面应变问题, 围岩只产生径向位移 $u(r, t)$, 对于如图9中的单位体积质元, 只有以径向应力做功的方式传递能量, 根据以上分析可以假定: 在面 S_1 上, 半径大于 $r+dr$ 的围岩对该质元做功, 向其输入能量; 而在面 S_2 上, 该单位质元对半径小于 r 的单位质元做功, 输出能量。

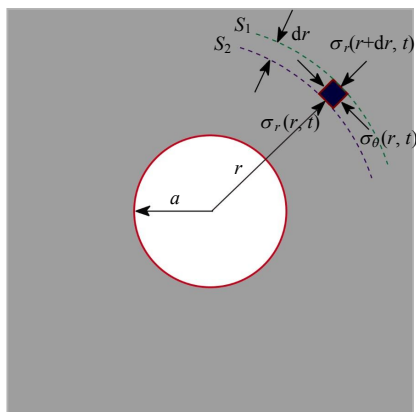


图9 单位体积质元示意图
Fig.9 Sketch map of unit volume zone

径向应力做功的瞬时功率记作 $\psi(r, t)$, 是 $\sigma_r(r, t)$ 与质点径向振速 $V(r, t)$ 的乘积:

$$\psi(r, t) = \sigma_r(r, t) \cdot V(r, t) \quad (14)$$

功率定义了单位时间内通过单位面积能量交换的速率。显然, $\psi(r, t)$ 代表了通过面积元的能量通量。如果在 $r+dr$ 处流过的能量比 r 处流过得多, 则 dr 处单位体积质元的能量 $\varphi(r, t)$ 减小, 即

$$\psi(r+dr, t) - \psi(r, t) = -dr \frac{\partial \varphi(r, t)}{\partial t} \quad (15)$$

或

$$\frac{\partial \psi(r, t)}{\partial r} + \frac{\partial \varphi(r, t)}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

式中: 单位体积质元的能量 $\varphi(r, t)$ 是其动能和应变能密度之和, 即

$$\varphi(r, t) = \frac{1}{2} \rho V^2(r, t) + \frac{1}{2E_0} \left\{ \sigma_r(r, t)^2 + \sigma_\theta(r, t)^2 + P_0^2 - 2\nu [\sigma_r(r, t) \cdot \sigma_\theta(r, t) + \sigma_r(r, t) \cdot P_0 + P_0 \sigma_\theta(r, t)] \right\} \quad (17)$$

图10中, L_1 为 $r=2a$ 处单位体积质元能量 $\varphi(r, t)$ (包括应变能和动能) 与原岩应变能密度 U_y 比值随时间变化曲线, $t=4$ ms 时, 曲线斜率为 K_1 ; 图11中, L_2 为 $t=4$ ms 时, 质元单位面积上的瞬时功率 $\psi(r, t)$ 随距离变化曲线, 显示了不同半径处岩体在单位时间, 单位面积上传递的能量值, $r=2a$ 处的曲线斜率为 K_2 , 单位为 s^{-1} 。 K_1 和 K_2 数值采用差值求得

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= \frac{\partial [\varphi(r, t)/U_y]}{\partial t} \bigg|_{(t=4 \times 10^{-3} \text{ s})} = 150.3 \\ K_2 &= \frac{\partial [\psi(r, t)/U_y]}{\partial r} \bigg|_{(r=10 \text{ m})} = -149.7 \\ \left| \frac{K_1 + K_2}{K_1} \right| &= 0.01 \approx 0 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式(18)验证了式(16)的正确性, 从而也论证了本文的观点: 伴随着卸载应力波由开挖面向深部岩体的传播, 能量以径向应力做功的方式在围岩中传递, 卸载应力波波阵面所到达的位置(半径为 r), 该处岩体应变能首先减小(释放), 通过径向应力做功的方式向半径小于 r 的岩体输入能量, 促使其应变能增大; 卸载应力波继续向前传播时, 半径大于 r 的岩体对该岩体(半径为 r)做功, 促使其应变能增大(聚集)。因此, 在围岩被卸载应力波扰动的初始时间段, 围岩应变能均会减小, 释放能量, 随后深部围岩通过径向应力做功的方式向近区围岩

传递能量,促使近区围岩应变能增大(聚集),最后稳定在静态开挖状态。

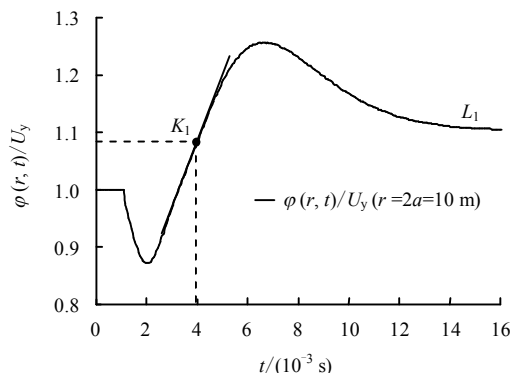


图 10 能量随时间变化曲线
Fig.10 Variation curve of energy vs. time

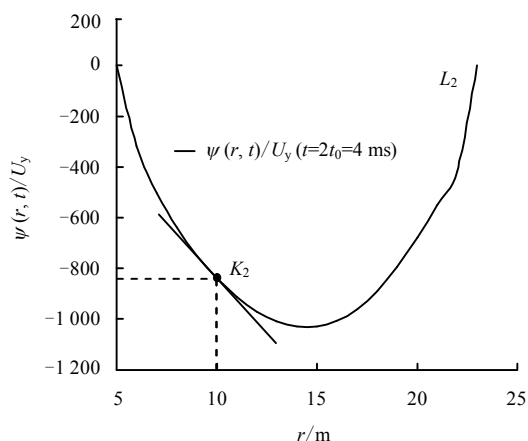


图 11 功率随距离变化曲线
Fig.11 Variation curve of power vs. distance

5 基于可释放应变能的损伤范围判定

当围岩中聚集的应变能 $U_w(r, t)$ 超过岩体的极限储存能时,能量易于沿最小压应力或拉应力 σ_3 方向释放^[14]。由图 5 可以看出,静水应力场圆形隧洞开挖,开挖面上初始地应力动态卸载过程中,围岩仍处于三向受压状态,根据谢和平等^[14]提出的“基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则”,岩体三向受压时基于可释放能量的损伤破坏准则为

$$[\sigma_\theta(r, t) - \sigma_r(r, t)] \cdot U_w(r, t) = \frac{\sigma_c^3}{2E_0} \quad (19)$$

令

$$\left. \begin{aligned} X &= 2E_0 \frac{[\sigma_\theta(r, t) - \sigma_r(r, t)] \cdot \max[U_w(r, t)]}{P_0^3} \\ Y &= 2E_0 \frac{[\sigma_\theta - \sigma_r] U_w}{P_0^3} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

则围岩损伤破坏阈值为

$$m = \sigma_c^3 / P_0^3 \quad (21)$$

根据上节分析结果,可以得到动态卸载切向应力和径向应力之差、应变能密度动态调整过程中的最大值,进而由式(20)可以计算出动态卸载应变能聚集系数 X 值随 r/a 变化曲线如图 12 所示(假定 $m=5$)。准静态卸载应变能聚集系数 Y 值可根据式(1)、(5)、(20)计算,图 12 也给出了其值随 r/a 变化曲线。

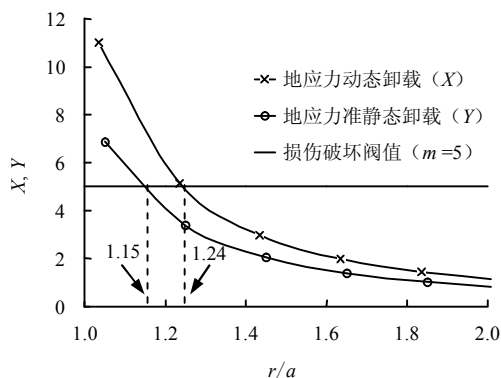


图 12 应变能聚集系数随 r/a 变化曲线
Fig.12 Variation curves of accumulation coefficient of strain energy with the r/a

由图可以看出,初始地应力动态卸载所导致的围岩损伤破坏范围 ($D_1=1.24a$) 明显大于初始地应力准静态卸载所产生的围岩损伤破坏范围 ($D_2=1.15a$),这是因为动态卸载条件下,围岩应变能聚集程度更高所导致的。

地应力动态卸载与准静态卸载的主要区别在于应力释放持续时间的不同。表 1 列出了不同地应力卸载时间条件下动态卸载所引起的应变能聚集幅度 $[\text{Max}[U_w(r, t)] - U_w]/U_w$ 及其围岩损伤破坏范围, $\text{Max}[U_w(r, t)]$ 、 U_w 分别为动态卸载时围岩应变能的峰值及应变能调整完成后的稳定值。从表 1 可以看到,开挖卸荷速率越快,动态卸载所引起的应变能扰动幅值越大,围岩的损伤破坏范围也越大。

表 1 不同卸载时间围岩应变能聚集幅度及损伤破坏范围
Table1 Strain energy accumulation amplitude and damage extent of surrounding rock under different unloading times

应力释放时间 t_0/ms		应变能聚集幅度/%		损伤破坏范围
		$r=2a$	$r=3a$	
动态卸载	1	14.61	10.47	1.26a
	2	13.54	9.53	1.24a
	4	11.20	7.79	1.21a
准静态卸载	24	0.00	0.00	1.15a

6 结 论

(1) 初始地应力准静态卸载时, 深部围岩通过径向应力做功的形式向浅部围岩传递能量, 促使浅部围岩应变能聚集, 且越靠近开挖面, 应变能聚集现象越明显。

(2) 初始地应力动态卸载过程中, 卸载应力波波阵面到达时, 围岩静水应力状态被打破, 围岩应变能先减小后增大, 即先对靠近开挖面的相邻岩体通过径向应力做功的方式释放自身的应变能, 随着卸载应力波的继续向前传播, 远离开挖面的相邻岩体又通过径向应力对其做功的形式促使其应变能聚集。能量靠径向应力做功的方式在围岩中由远及近传递。

(3) 相比初始地应力准静态卸载, 动态卸载过程中, 围岩应变能集聚程度更高, 损伤破坏范围更大。开挖卸荷速率越快, 动态卸载所引起的应变能扰动幅值越大, 围岩的损伤破坏范围也越大。

在实际地下洞室开挖过程中, 地应力动态卸载伴随着炸药爆炸过程而发生, 爆炸荷载以及爆炸荷载与应力瞬态释放耦合作用下应变能调整力学机制还需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 伍法权, 伍劼, 祁生文. 关于脆性岩体岩爆成因的理论分析[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 589—595.
WU Fa-quan, WU Jie, QI Sheng-wen. Theoretical analysis of mechanism of rock burst of brittle rock mass[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2010, 18(5): 589—595.
- [2] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803—2813.
HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803—2813.
- [3] 徐则民, 黄润秋, 范柱国, 等. 长埋隧道岩爆灾害研究进展[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(2): 16—24.
XU Ze-min, HUANG Run-qiu, FAN Zhu-guo, et al. Research of rock burst disaster in deep tunnel[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2004, 13(2): 16—24.
- [4] ABUOV M G, AITALIEV S M, ERMEKOV T M, et al. Studies of the effect of dynamic processes during explosive break-out upon the roof of mining excavations[J]. *Soviet Mining Science*, 1989, 24(6): 581—590.
- [5] 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 and Geomechanics Abstracts*, 1990, 27(2): 129—132.
- [6] 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 Xian-qi, SHU Mao-xiu. Dynamic fracture criterion of rock blasting——D criterion [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1996, 7(2): 1—5.
- [7] 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.
- [8] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565—3570.
XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang. Energy dissipation of rock deformation and fracture[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3565—3570.
- [9] 华安增. 地下工程周围岩体能量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(7): 1054—1059.
HUA An-zeng. Energy analysis of surrounding rocks in underground engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(7): 1054—1059.
- [10] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨, 等. 岩石破坏的能量分析初探[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(15): 2603—2608.
XIE He-ping, PENG Rui-dong, JU Yang, et al. On energy analysis of rock failure[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(15): 2603—2608.
- [11] 潘岳, 王志强, 吴敏应. 巷道开挖围岩能量释放与偏应力应变能生成的分析计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 663—669.
PAN Yue, WANG Zhi-qiang, WU Min-ying. Analysis and calculation of energy release and deviatoric stress energy generation of surrounding rock in tunnel excavation process[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(4): 663—669.
- [12] LU W B, YANG J H, YAN P, et al. Dynamic response of rock mass induced by the transient release of in-situ stress[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 53(7): 129—141.
- [13] 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.
- [14] 谢和平, 鞠杨, 黎立云. 基于能量耗散与释放原理的岩石强度与整体破坏准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(17): 3003—3010.
XIE He-ping, JU Yang, LI Li-yun. Criteria for strength and structural failure of rocks based on energy dissipation and energy release principles[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(17): 3003—3010.