

基于扰动响应判据的洞室岩爆分析

康政虹 高正夏 丁向东 王映霞

(河海大学土木工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 : 详细描述岩爆形成过程 , 总结其特点并对岩爆的影响因素作了系统分析 , 认为 : 岩石在具备大量弹性应变能又处在峰值强度以后 , 处于非稳定的平衡状态 , 此时再对其施加干扰性因素 , 则会失稳 . 在此基础上进一步将稳定性理论应用于岩爆判据分析 . 工程实例计算表明 , 该方法能较好地解释许多岩爆现象 .

关键词 : 岩爆 ; 干扰性因素 ; 岩爆判据

中图分类号 : TU457 文献标识码 : A 文章编号 : 1000-1980(2003)02-0188-05

岩爆是矿山坑道、水电洞室、交通隧道等地下工程的一大动力地质灾害^[1~4], 是岩石材料应变软化造成的力学上的失稳现象 . 自 1783 年首次报道英国锡矿发生岩爆以来 , 世界范围内已有德、南非、中、前苏联、波、捷、匈、保、奥、意、瑞典、新西兰、安哥拉等 21 个国家和地区记录有岩爆问题 . 岩爆破坏程度之大 , 早已引起各国重视 . 国内外学者也已为此进行了大量的研究^[5,6]. 这些研究虽然应用有关基础理论分别从强度、刚度、稳定、能量、断裂、损伤以及突变理论等方面对岩爆机理进行了分析 , 但仍然停留在假说和经验阶段 , 考虑的仅是主控因素 , 尤其是对岩爆形成机理的认识以及岩爆判据的研究 , 更是众说纷纭 . 本文在系统分析影响岩爆主要因素的基础上研究了当具有应变软化性质的介质处于平衡状态时 , 一旦遇有外界微小扰动并在已积累大量弹性应变能的条件下则有可能失稳的问题 , 并将该扰动响应判据应用于工程实例 .

1 岩爆的影响因素

限定岩爆的含义为 : 具有大量弹性应变储备的岩(矿) 体 , 由于开挖洞室或坑道 , 使地应力分异 , 围岩应力跃升及能量进一步集中 , 在围岩应力作用下 , 产生张-剪脆性破坏 , 并伴随声响和振动 , 围岩由静态向动态失稳发展 , 以造成岩块(片) 隔离母体 , 获得有效弹射能量 , 猛烈向临空面方向抛(弹) 射为特征 , 经历“ 劈裂成板—剪断成块—块片弹射 ” 渐进破坏全过程的动力现象 . 影响岩爆的因素很多 , 主控因素有 (a) 地质构造——将决定围岩的初始地应力场 (b) 地层岩性——包括岩体结构、岩石的强度、脆弹性质、储能性 , 将决定岩爆的烈度 (c) 洞室的开挖情况——将决定围岩二次应力场的大小与分布及应力集中情况 . 关于岩爆的产生条件 , 一些学者认为 : 一是岩体本身要坚硬、完整且强度高 , 能集聚较高的弹性能 ; 二是岩体处在能使其变形和破裂的高地应力场的作用之下 ; 三是洞室围岩中要存在岩爆应力状态 , 即径向应力为零的双轴应力状态和径向应力为最小主应力的真三轴应力状态^[7]. 一般而言 , 在产生岩爆的地下工程区 , 围岩处于由三向应力 p 、 q 和 S 所成地应力场的作用之下 , 如图 1 所示 . 其中 p 为铅直向应力 , q 为水平向应力 , S 为洞轴向应力 , a 为洞室半径 , θ 为 OA 与水平轴的夹角 , σ_r 为径向应力 , σ_θ 为环向应力 , $\tau_{r\theta}$ 为剪切应力 .

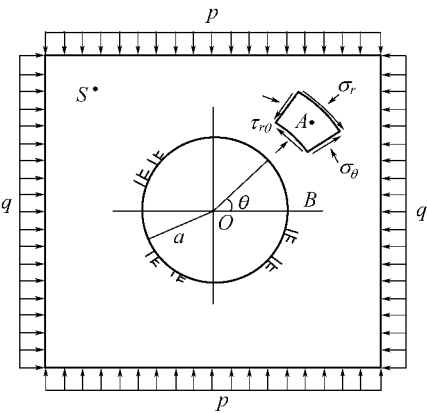


图 1 围岩受力状态

Fig.1 Stress state of surrounding rock

2 洞室稳定性的扰动响应判据

2.1 岩爆判据

影响岩爆发生的因素非常复杂^[8],如 (a)荷载的不确定性.对于地下洞室而言,初始地应力场一般是根据几个测孔的量测值通过回归方法近似地获得的,其不确定性主要来源于地应力场空间量测数据的离散性、实际地应力场与实测地应力场的数据间的误差以及回归分析计算模型的不确定性.(b)材料参数的不确定性.研究表明,岩土材料 f 和 c 的变异性较大,尤其是 c 值,其变异系数有时高达 0.5 左右,且 f 和 c 的空间随机特性十分明显.(c)几何尺寸的不确定性.由于地质体的复杂性,导致断层、裂隙、节理等结构面的几何分布情况(包括走向、倾角以及间距等)一般很难准确把握.而这些结构面的几何分布情况对于控制岩爆的发生有着重要意义.(d)初始条件和边界条件的不确定性.这些不确定性来源于实际问题的复杂性、边界条件变化的不可预知性、人类认识的局限性以及对结构边界处的简化处理等.(e)计算模型的不确定性.针对不同的材料和受力情况,人们提出了许多本构模型和强度准则,然而不同模型所反映的侧重点不同,很难说哪一种模型对于任何一种地质体都十分准确.

上述影响因素的存在,导致了基于现有的岩爆理论和岩爆判据得出的结果并不系统、全面.当然对这些因素的全面考虑是具有相当难度的,而且也势必使问题复杂化.虽然这些理论和判据尚不够准确,其中的一些假设还缺乏理论和试验验证,但它们仍将大大有助于岩爆研究的深入与发展.

2.2 扰动响应判据的提出

当把一个岩块轻轻地放在一个粗糙面上时,实际接触的面积几乎为零,全部的接触力是由 3 个或更多一些的点来承受.在增加法向荷载的情况下,由于弹性变形、压碎作用与张裂作用而使点接触的面积扩大,产生新的接触面.典型不连续面的 $\sigma \sim \Delta V$ 关系如图 2 所示, V_{mG} 为最大可能的闭合量.大量试验结果表明,岩石的力学性质是随变形增加而变化的.在开始加载时,岩石试件原有的开口裂纹逐渐闭合,随着荷载的增加,进入线弹性变形阶段,在原有开口裂纹闭合的同时,又开始产生新的裂纹.当变形超过弹性极限时,微裂纹不断产生和传播,及至峰值强度附近,由于裂纹的迅速扩展,彼此之间形成搭接和连通,最终形成宏观裂缝.从开始加载直至峰值强度前,岩石抵抗变形的能力不同.岩石全程应力应变曲线如图 3 所示. OA 段是裂纹压密阶段,由于裂纹的逐渐压密,抵抗变形能力呈增加趋势; AB 段呈线弹性,原有裂纹被压密的同时又不断产生新的裂纹,二者基本相当.超过弹性极限 B 后,由于裂纹迅速传播和扩展,其抵抗变形能力随变形的增加而递减.超过峰值强度后,裂纹大量生成,并最后贯通形成宏观破坏. CD 段发生变形集中而使抵抗变形的能力降低,因此该段为应变软化段.

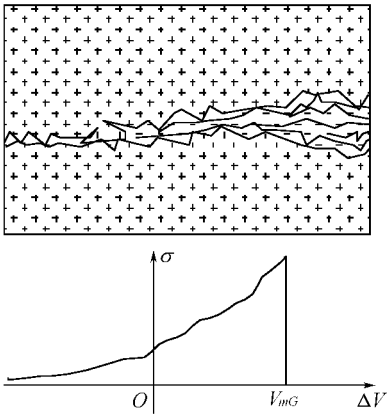


图 2 不连续面 $\sigma \sim \Delta V$ 关系
Fig.2 $\sigma \sim \Delta V$ curve for discontinuous surface

具有应变软化性质的介质是非稳定的.当其处于平衡状态时,一旦遇有外界微小扰动并在已积累大量弹性应变能的条件下可能失稳(岩爆),从而在瞬间释放大量的能量.根据稳定性理论,可提出洞室岩爆形成的扰动响应判据.

2.3 洞室稳定性的扰动响应判据

所谓干扰性因素是指在描述系统方程时与其基本力相比甚小而未予考虑的力.这些力通常是不会确切

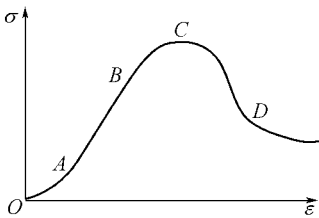


图 3 岩石全程应力应变曲线
Fig.3 Complete stress ~ strain curve of rock

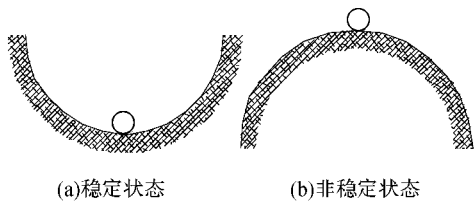


图 4 两种平衡状态
Fig.4 Two balanced states

知道的,它们可以瞬间作用,因而会引起物体系统状态的微小变化.在地下洞室问题中,干扰性因素可能是洞室开挖、地震、围岩振动等.这些扰动性因素在实际工程中是不可避免的.

事实上,微小扰动对于不同的系统或同一系统在不同运动(平衡)状态下,所产生的响应是不同的.如图4所示的两种平衡状态(a)状态是稳定的,而(b)状态与其受到的微小扰动相比,其响应是无穷大的,故(b)状态为非稳定的平衡状态.

实际工程表明,岩爆滞后于洞室开挖几小时到几十小时.因此, σ_r 变为零后, σ_θ 和轴向应力 σ_z 的应力集中和应力重分布有一个取决于洞周岩体条件的过程.应力集中使洞室周边附近部分围岩在应力超过峰值强度后进入塑性应变软化状态,该区内岩体的承载能力随变形增加而减小;而深部岩体仍处于硬化或弹性状态,该区内岩体承载能力随变形的增加而增加.

设在某一时刻,洞室远处的岩体应力为 p ,产生的塑性区大小为 ρ , a 为洞室半径, $\rho > a$,洞室围岩系统处于平衡状态.假设有一外加的微小扰动应力 Δp ,使洞室岩体应力增加到 $p + \Delta p$,则在扰动应力作用下,软化区岩体承载能力进一步下降,多余的应力转移到与其邻近的弹性或硬化区,而使软化区进一步扩大到 $\rho + \Delta \rho$.若此时洞室又处于新的平衡状态,则系统是稳定的,扰动 Δp 产生的响应是一个有限值.用数学方法定义为:若对于 $\forall \epsilon > 0, \exists \delta > 0$,使得扰动 Δp 满足条件

$$|\Delta p| < \epsilon \tag{1}$$

时,响应 $\Delta \rho$ 总可以满足不等式

$$|\Delta \rho| \leq \delta \tag{2}$$

则此时洞室系统的平衡状态是稳定的.

随着洞室岩体应力的增加,扰动引起的响应也不断增加.当岩体应力达到某一值 p^* 时,如果有微小扰动 Δp 作用,引起的应力转移和塑性区扩大的过程就不可停止,而且这个过程进行得越来越快,使塑性区增量变成无穷大,即

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta p} = \frac{d\rho}{dp} \rightarrow +\infty \tag{3}$$

洞室围岩无法满足式(1)(2)的稳定性判据,则此时洞室处于非稳定平衡状态.确定洞室稳定与非稳定之间的临界状态,就是寻找恰好使塑性区无限扩大时的岩体应力——洞室失稳的临界岩体应力.式(3)即为洞室失稳的扰动响应判据.本文以圆形洞室为例推导了圆形洞室基于扰动响应判据发生岩爆的解析解.工程实例表明,该判据有一定的实用价值.

如图5所示的圆形洞室,半径为 a ,不考虑支护,内表面自由,在无限远处受静水压力 p 作用,塑性软化区半径为 ρ ,考虑平面应变情况,由弹性区内应力解答

$$\sigma_r = \frac{\rho^2}{r^2} \sigma_r^p + \left(1 - \frac{\rho^2}{r^2}\right)p \quad \sigma_\theta = -\frac{\rho^2}{r^2} \sigma_r^p + \left(1 + \frac{\rho^2}{r^2}\right)p \tag{4}$$

得出软化区和弹性区交界处应力为

$$\sigma_r = \sigma_r^p \quad \sigma_\theta = 2p - \sigma_r^p \tag{5}$$

软化区和弹性区交界处岩体的特点是刚进入屈服状态,采用库仑准则较为合适:

$$\sigma_\theta = q\sigma_r + \sigma_c \tag{6}$$

式中: $q = (1 + \sin \varphi) / (1 - \sin \varphi)$; φ ——岩石内摩擦角; σ_c ——单轴抗压强度.

把式(5)代入式(6)得

$$\sigma_r^p = (2p - \sigma_c) / (1 + q) \tag{7}$$

处于软化区内的岩体由于已进入峰值强度后的破坏变形阶段,首先需满足平衡方程和几何方程

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \tag{8}$$

$$\epsilon_r = \frac{du}{dr} \quad \epsilon_\theta = \frac{u}{r} \tag{9}$$

假设软化区内体积不可压缩($\mu = 1/2$),则有

$$\epsilon_r + \epsilon_\theta + \epsilon_z = 0 \tag{10}$$

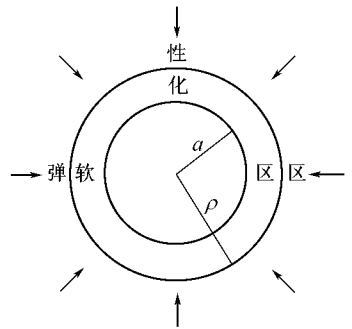


图5 圆形洞室岩爆分析模型
Fig.5 Analytical model for rockburst in circular cavern

将式(9)代入式(10),并考虑平面应变情况,即 $\epsilon_z = 0$,得

$$u = B/r \quad \epsilon_r = -B/r^2 \quad \epsilon_\theta = B/r^2 \tag{11}$$

式中 B 为积分常数,由式(11)可计算出软化区内应变强度

$$\epsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{B}{r^2} \tag{12}$$

在软化区和弹性交界处, $\epsilon_i = \epsilon_c$,以 $r = \rho$ 代入式(12)得

$$B = \frac{\sqrt{3}}{2} \rho^2 \epsilon_c \tag{13}$$

此外,软化区内应力应满足应力边界条件,在洞室周边,不考虑支护,有

$$\sigma_r|_{r=a} = 0 \tag{14}$$

除了满足式(7)和式(14)外,软化区内岩体还应满足其物理方程,但需作出假设.假设软化区内岩体满足库仑准则,软化区内岩石强度 σ_c 是随塑性变形的大小而变化的,认为 σ_c 是应变强度 ϵ_i 的函数,即 $\sigma'_c = \sigma'_c(\epsilon_i)$,则

$\sigma'_c(\epsilon_i) = \sigma_c - \lambda \left(\frac{\rho^2}{r^2} \epsilon_c - \epsilon_c \right)$.故软化区岩体应满足的物理关系为

$$\sigma_\theta = q\sigma_r + \sigma_c - \lambda \left(\frac{\rho^2}{r^2} \epsilon_c - \epsilon_c \right) \tag{15}$$

根据平衡方程式(8)和式(15),得到软化区内应力满足的微分方程为

$$\frac{d\sigma_r}{dr} - (q-1) \frac{\sigma_r}{r} = \frac{\sigma_r + \lambda\epsilon_c}{r} - \frac{\lambda\epsilon_r}{r^3} \rho^2 \tag{16}$$

解此微分方程得应力为

$$\sigma_r = Qr^{q-1} + \frac{\lambda\epsilon_c}{q+1} \frac{\rho^2}{r^2} - \frac{\sigma_c + \lambda\epsilon_c}{q-1} \tag{17}$$

式中 Q 为积分常数,由应力边界条件式(7)(14)得

$$Qa^{q-1} + \frac{\lambda\epsilon_c}{q+1} \frac{\rho^2}{a^2} - \frac{\sigma_c + \lambda\epsilon_c}{q-1} = 0 \tag{18}$$

$$Q\rho^{q-1} + \frac{\lambda\epsilon_c}{q+1} - \frac{\sigma_c + \lambda\epsilon_c}{q-1} = \frac{2p - \sigma_c}{q+1} \tag{19}$$

从(18)(19)两式消去 Q 得到 ρ 与 p 之间的关系为

$$\frac{\rho^{q-1}}{a^{q-1}} \frac{\sigma_c + \lambda\epsilon_c}{q-1} - \frac{\lambda\epsilon_c}{q+1} \frac{\rho^{q+1}}{a^{q+1}} = \frac{2p - \sigma_c}{q+1} + \frac{\sigma_c + \lambda\epsilon_c}{q-1} - \frac{\lambda\epsilon_c}{q+1} \tag{20}$$

由式(20)得

$$\frac{d\rho}{dp} = \frac{2(q+1)^{-1}}{(\sigma_c + \lambda\epsilon_c) \frac{\rho^{q-2}}{a^{q-2}} - \lambda\epsilon_c \frac{\rho^q}{a^{q+1}}} \tag{21}$$

当式(21)分母为 0 时,即

$$\rho^2/a^2 = 1 + E/\lambda \tag{22}$$

时,有 $\frac{d\rho}{dp} = \infty$,满足失稳判据式(3),受扰动后即可发生失稳.相应的临界应力 p^* 为

$$\frac{p^*}{\sigma_c} = -\frac{1}{q-1} \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) + 0.5 \frac{q+1}{q-1} \left(1 + \frac{\lambda}{E} \right) \left(1 + \frac{E}{\lambda} \right)^{\frac{q-1}{2}} - 0.5 \frac{\lambda}{E} \left(1 + \frac{E}{\lambda} \right)^{\frac{q+1}{2}} \tag{23}$$

当满足式(22)时,干扰性因素引起的响应将无穷大,此时,洞室受扰后即可发生岩爆;发生岩爆时岩体的临界应力 p^* 由式(23)求得.

3 工程实例

某水电站,最大坝高 73.4 m,利用水头 438 m,装机容量为 25 万 kW.利用三维非线性有限单元法对电站地下厂房及部分输水隧洞进行模拟.整个区域剖分成 2022 个 8 结点等参单元,2749 个结点.电站发电洞、地下厂房区域共剖分成 19200 个 8 结点等参单元,21424 个结点.计算分析得出:在第一次开挖过程中,地下厂房顶拱部位地应力值较大,最大的可达 25~26 MPa,存在岩爆的可能,同时,由于最大地应力的方向与洞轴线呈

斜交状态,在地下厂房区为岩爆的发生提供了一个有利的条件,另外,主变室顶部及尾水隧洞的顶部地应力值也较大,可达到 20 MPa,也可能发生岩爆。在第二次开挖过程中,母线洞的应力值较大,最大可达到 24.5 MPa,另外,尾水隧洞的应力值也较大。第三次开挖,由于大部分区域在第二次开挖完毕时岩体释放了部分应变能,导致应力在大部分区域出现降低现象。

计算表明,该地下厂房在有开挖扰动时,满足失稳判据式(22)。由式(23)得出的理论上发生岩爆的临界荷载为 $p^* = 1.83 \text{ MPa}$ 。这与实测的洞室发生岩爆的临界荷载 $p^* = 1.78 \text{ MPa}$ 相接近,与有限元的计算结果也较吻合。

4 结 语

a. 岩爆现象,虽然影响因素较为复杂,但基于一些假设和经验形成的岩爆理论和判据也将大大有助于岩爆研究的深入与发展。

b. 岩石在已具备大量弹性应变能及峰值强度以后处于非稳定的平衡状态,但在干扰性因素如洞室的开挖、地震、围岩振动等因素的影响下,岩石会失稳。因此,可将稳定性理论应用于岩爆判据分析。干扰性因素是岩爆形成的触发因素。

c. 在地下洞室的开挖中,只有在洞周应力重分布过程中的 σ_r 和 σ_θ 按一定比例上升的应力路径下才能发生岩爆,而 σ_r 和 σ_θ 的应力集中和应力重分布有一个取决于洞周岩体条件的过程。

d. 有限元分析及工程实例表明,本文提出的基于扰动响应的岩爆判据能较好地解释许多岩爆问题。

参考文献:

- [1] 蒋承林. 岩爆对矿井突出的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(5): 502—507.
- [2] 谭以安. 岩爆形成机理研究[J]. 水文地质工程地质, 1989(1): 78—82.
- [3] 张津生, 陆家佑, 贾愚如. 天生桥二级水电站引水隧洞岩爆研究[J]. 水力发电, 1991, 11(10): 34—37.
- [4] 周德培, 洪开荣. 太平驿隧洞岩爆特征及防治措施[J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 171—178.
- [5] XIE H, PARISEAU W G. Fractural character and mechanism of rock burst[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1993, 30(4): 237—242.
- [6] 陆家佑. 岩爆数值模拟与预测[A]. 见: 中国岩石力学与工程学会岩石动力学专委会编. 第三届全国岩石动力学学术会议论文集[C]. 武汉: 武汉测绘学院出版社, 1992. 84—99.
- [7] 许东俊, 章光, 李延芥, 等. 岩爆应力状态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 169—172.
- [8] 刘宁, 郑建青. 工程随机力学及可靠性理论中的若干问题[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(5): 1—7.

Disturbance response criterion based rockburst analysis

KANG Zheng-hong, GAO Zheng-xia, DING Xiang-dong, WANG Ying-xia

(College of Civil Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China)

Abstract: A systematic analysis was made of the formation and properties of rockbursts and some affecting factors. It is concluded that with enough elastic deformation energy and beyond the peak strength, rocks are in an unstable equilibrium state. Under such a condition, any minor disturbance will result in the instability of rocks. Besides, the theory of stability was further applied to the analysis of the criterion of rockburst. Practices show that the present method can explain some phenomena in rockbursts and provides a new approach to the study of some complex problems concerning rockbursts.

Key words: rockburst; disturbing factor; criterion of rockburst