

地下工程岩爆及其风险评估综述

周青春 , 李海波 , 杨春和

(中国科学院武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 根据国内外的研究成果对岩爆进行了数学描述, 结合岩性及地质条件、应力条件讨论了发生岩爆的内、外因条件, 据此, 对岩爆进行了预测。指出岩爆并非单一因素导致的事件, 而是典型的多种因素综合作用的结果。因此, 在岩爆预测时, 应根据其发生的条件, 采用综合判别准则。

关 键 词: 岩爆; 模型; 能量; 应力; 预测

中图分类号: TV 542 **文献标识码:** A

Review of evaluation of rockburst and hazard in underground engineerings

ZHOU Qing-chun , LI Hai-bo , YANG Chun-he

(Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

Abstract: This paper reviews the present studies on the mathematical descriptions, mechanism as well as the influence factors of rockburst. It is indicated that the geology, the stress condition and the mechanical properties of rockmass are the basic factors for the formation of rockburst. It is also suggested that all of the factors be conceded for the prediction of rockburst in underground engineerings.

Key words: rockburst; model; energy; stress; prediction

1 前 言

岩爆是深埋地下工程施工过程中常见的动力破坏现象, 它是由于岩石积聚的应变能大于岩石破坏所消耗的能量时, 多余的能量导致岩石碎片从岩体中剥离、崩出。强烈的岩爆常常带来严重的后果, 如人员伤亡、施工设备毁损, 甚至地下工程报废等等。针对这一问题, 很多学者根据现场调查及室内模型试验对岩爆的发生机理、预测方法、及控制手段等方面做了大量的工作^[1~9]。但由于岩石固有的一些特性, 如各向异性、不均匀性, 许多研究成果仅限于某些方面的事后验证, 没有形成统一地认识。因此, 岩爆问题的研究还远没有形成系统的研究成果。

本文简要介绍了国内外目前在岩爆的数学描述、发生条件以及预测方面进行的工作, 旨在为相关的研究工作提供借鉴。

2 岩爆的数学描述

在分析岩爆发生机制时, 人们注意到, 地下洞室岩爆是岩体由于几何及力的边界条件发生变化而引起的岩石材料力学性质发生改变, 从而, 导致岩体突然失稳。这种失稳是一种突变现象, 它具有多个平衡位置、突跳、滞后、发散和不可达等特点。应用现代数学中的突变理论, 可以对此过程进行较好地描述, 例如, 初等突变理论中的尖点突变模型^[10, 11]。

尖点突变模型的标准势函数为^[12]

$$\Pi(x) = x^4 + ux^2 + vx \quad (1)$$

式中 $\Pi(x)$ 为势函数; x 为状态变量; u, v 为控制变量。

令 $\Pi'(x) = 0$, 可以确定其平衡位置:

$$\Pi'(x) = 4x^3 + 2ux + v = 0 \quad (2)$$

方程(2)实根的数目,由判别式 $\Delta = 8u^3 + 27v^2$ 决定。

根据突变理论, $\Pi'(x) > 0$ 为稳定的平衡, $\Pi'(x) < 0$ 为不稳定平衡, $\Pi''(x) = 0$ 为两者间的转折点。同时,在状态-控制变量空间中,曲面 $M: x^4 + ux^2 + vx = 0$ 称为平衡曲面。参数空间曲面 $B: 8u^3 + 27v^2 = 0$ 称为分叉集,如图 1 所示。在平衡曲面的上、中、下三叶分别代表可能的三个平衡位置,其中上下叶为稳定平衡,中叶为不稳定平衡。

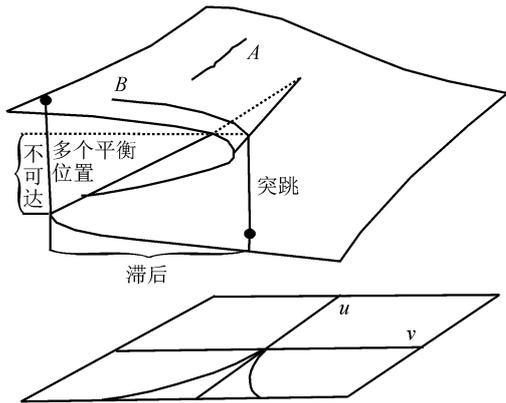


图 1 尖点突变模型^[12]

Fig.1 Catastrophe model of sharp point

用尖点突变模型可以对岩爆现象进行解释。设 x 为表征洞室稳定状态的变量; u, v 为影响洞室稳定性的变量,在图 1 中可以观察到不同的 u, v 路径上洞室的稳定状态发生的变化。

A 路径始终处于上叶,在该路径上洞室一直处于稳定的平衡状态。虽然,该路径上洞室也有可能进入破坏状态,但这种破坏是一个连续的过程,如围岩较软,其单轴抗压强度较低,高地应力区的应力值超过了岩石的长期强度,洞室出现加速蠕变直至破坏的一种流变过程,而不是突然失稳。B 路径开始处于稳定平衡的上叶,当到达上叶与中叶的褶皱折时,系统由稳定向非稳定过渡。此时,若围岩受到轻微的扰动,如爆破振动导致控制变量发生微小变化,路径继续往前时,洞室的状态不可能进入中叶,因为中叶是不稳定的,亦即不可能达到的状态,洞室控制变量经过调整,其状态直接跳跃到下叶,发生岩爆,洞室失稳。该路径下洞室的状态不连续变化称之为突变。

由于岩爆与围岩储存和释放的能量有关,因此,一般从能量角度对洞室和围岩组成的系统进行定量分析。

文献[10]根据最小位能原理建立了圆形洞室的

尖点突变模型,并定量地研究了岩爆的发生过程,得出了岩爆发生时系统必须满足的条件。

假设外力作用在圆形洞室外的无限远处,在围岩应力作用下,围岩分为弹性区和软化区,相应的应变能分别为 p^e 和 p^s 。

$$p^e = \int_0^{2p} \int_r^{+\infty} \left(\frac{1}{2} s_r e_r + \frac{1}{2} s_q e_q \right) r dr dq = \frac{pE}{1+u} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 u_0^2 \quad (3)$$

$$p^s = \int_0^{2p} \int_0^r W_r dr dq = A_1 u_0^2 + B_1 u_0^3 + C_1 u_0 + \frac{1}{2} e(r^2 - r_0^2) \quad (4)$$

总应变能:

$$\left. \begin{aligned} p(u_0) &= p^e + p^s \\ p(u_0) &= A_1 u_0^4 + B_1 u_0^3 + \frac{pE}{1+u} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 u_0^2 + \\ &C_1 u_0 + \frac{1}{2} e(r^2 - r_0^2) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

系统的势能由应变能和外力功组成,外力作用点在无限远处,该处位移为零,故外力势能为零, $W = p(u_0)$ 。

当势能取极值时,系统处于平衡位置即 $W' = 0$, 或 $p' = 0$ 。

$$p'(u_0) = 4A_1 u_0^3 + 3B_1 u_0^2 + \frac{2pE}{1+u} \left(\frac{r_0}{r} \right)^2 u_0 + C_1 = 0 \quad (6)$$

将式(6)变换成式(2)相同的形式:

$$x^3 + px + q = 0 \quad (7)$$

$$p = 3(K - 1) \quad (8)$$

$$q = -2 + 3K + 3h \quad (9)$$

各符号的意义见文献[10]。

K 为围岩弹性区广义刚度与软化区广义刚度绝对值之比。

发生岩爆时,系统处于非稳定平衡状态,此时 $p''(u_0) < 0$, 得 $p < 0$ 。

由式(8)可知,若 $p < 0$, 则 $K < 1$ 。根据 K 的定义,发生岩爆时,弹性区广义刚度小于软化区广义刚度。广义刚度不仅与岩石参数 m, E 有关,而且与外荷载有关。由于该条件是在发生岩爆的前提下得出的,故 $K < 1$, 称为围岩发生岩爆的必要条件。

3 与岩爆事件相关的几个因素

岩爆的发生与很多因素有关,一般分为以岩性为主的内因条件和以围岩应力、结构及施工荷载为主的外因条件。

3.1 岩性因素

岩爆是由于围岩储存的弹性应变能大于岩石破碎所消耗的能量，引发岩石碎片从岩壁突然飞崩出来的现象。因此，发生岩爆的围岩必然有较高的储存弹性应变能的能力。一般来讲，坚硬、完整的岩体，其储存应变能的能力高，发生岩爆的倾向性也高。

判断岩石发生岩爆的倾向性大小，可以通过多种指标测试，目前，较常用的指标有岩石的脆性系数、弹性变形能指数、岩石冲击能指标。

人们很早就注意到岩爆与岩石脆性有很大的关系，岩石的脆性越大，岩爆的倾向越高。现代细观力学通过室内试验及现场采样的断口扫描电镜分析^[1, 2]，也证明了这种关系。文献[2]研究发现，岩爆是一渐进破坏过程，即劈裂成板→剪断成块→片、块弹射，在这个过程中，最基本的现象，就是岩体脆性断裂破坏。从这个意义上讲，可以认为岩爆与岩石的脆性断裂有关。

岩石的破裂是岩石内部微裂纹产生、发展的宏观结果。脆性破裂是指岩石破裂之前未出现任何明显永久变形的破裂形态。由于岩石结构的复杂性(非均质、不连续)，发生宏观破裂之前的岩石形态决不是纯弹性的，故脆性破裂概念指的是那种在很小(与弹性应变相比)的非弹性应变之后发生的破坏。岩石的单轴和三轴压缩试验均可以看出，脆性大的岩石峰值后很快发生宏观破坏，相对来讲，破坏消耗的能量较少。

由岩爆的破坏过程可知，岩石的脆性破坏是岩爆发生的必不可少的先决条件之一，因此，岩爆倾向性指数在很大程度上取决于岩石的脆性。

岩石的脆性系数 B 可用下式表示：

$$B = \frac{s_c - s_t}{s_c + s_t} \tag{10}$$

式中 s_t, s_c 分别为岩石单轴抗压、抗拉强度(MPa)。

文献[14] 建议根据下式计算岩石的脆性系数，并划分岩石的岩爆倾向：

$$B = a \frac{s_c e_f}{s_t e_b} \tag{11}$$

式中 a 为调节参数，一般取 0.1； \hat{a}_f, \hat{a}_b 分别为单轴压缩条件下峰值前后的应变。

当 $B < 3$ 时，无岩爆发生；当 $3 < B < 5$ 时，发生轻微岩爆；当 $B > 5$ ，发生严重岩爆。

弹性变形能系数是通过岩石单轴压缩试验得出的结果。当轴向荷载 $s = (0.7 \sim 0.8)s_c$ 时，开始卸

载，求出卸载过程中试样所释放的弹性变形能 f_{sp} 及岩石发生塑性变形和微破坏所消耗的能量 f_{st} ，如图 2。两者的比值 $F = f_{sp} / f_{st}$ 称为弹性变形能指数。根据 Kwasnieski M 1994 年研究结果^[15]， F 越大，发生岩爆的强度越高。以下是根据煤岩试验得出的指标：

当 $F < 2.0$ 时，无岩爆；

当 $2.0 < F < 5.0$ 时，发生由弱至中等程度岩爆；

当 $F > 5.0$ 时，发生强岩爆。

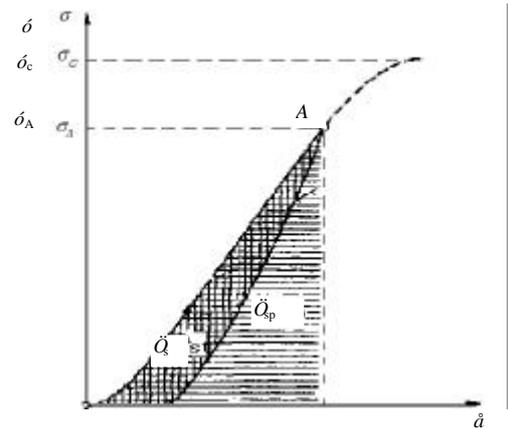


图 2 岩石的加载卸载曲线^[15]

Fig.2 Loading and unloading curves of rocks^[15]

岩石的冲击能指标 W_{CF} 是指岩石在单轴压缩的应力-应变全过程曲线中，以应力峰值为界的左右部分曲线与应变坐标所围成的面积，亦即岩石加载过程中所吸收的能量 F_1 与破坏过程中所消耗的能量 F_2 之比， $W_{CF} = F_1 / F_2$ ，如图 3。

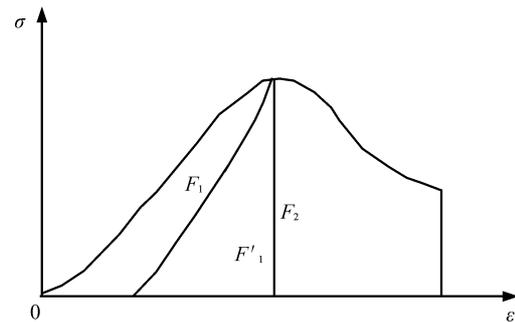


图 3 应力-应变全过程曲线

Fig.3 Complete stress-strain curve of rocks

冲击能指标 W_{CF} 旨在建立岩石在破裂过程中释放的能量与消耗能量的关系，当 $W_{CF} > 1$ 时，认为该岩石有发生岩爆的倾向。实际上，该指标仅对坚硬的岩石才有意义。如前所述， F_1 中包含岩石发生塑性变形和微破坏所消耗的能量，而不是峰值后区岩石破裂所释放的能量。对坚硬岩石 F_1 几乎等于岩石中储存的弹性应变能。因此，该指标在预测岩石

的岩爆倾向时较弹性变形能系数方法保守。文献[9]建议在 F_1 中减去岩石加载过程中所消耗的能量,即取卸载曲线下的面积 F_1' 代替加载曲线下的面积 F_1 (见图3)。用该方法确定的冲击能指标 W_{CF}' 更能反映岩石的岩爆倾向。

除了上述三种关系外,有些学者还提出其它方法确定岩爆倾向,如松弛试验法、能量比及动态法等等,并建立了相应的判别准则,这些方法在一定程度上可预测岩爆的倾向。

3.2 岩爆发生的应力条件

在有岩爆倾向的岩体中进行地下工程施工时,高的地应力使岩体聚集较高的应变能,在满足一定的条件时,将导致岩爆的发生。根据国内一些工程统计数据,地应力场中最大主应力 σ_1 与单轴抗压强度 σ_c 满足以下关系时,有可能发生岩爆^[14]:

$$\sigma_1 = (0.15 \sim 0.2)\sigma_c \quad (12)$$

地下工程施工过程中,开挖卸载使围岩应力重新分布, σ_r 和 σ_c 按一定的比例同步上升,洞壁上 $\sigma_r=0$,岩爆在 σ_r 和 σ_c 上升的过程中发生^[6]。此时控制洞室稳定的主导因素为洞室的切向应力,据文献[4]的研究结果,切向应力与岩石单轴抗压强度间满足以下关系时有可能发生岩爆:

$$\sigma_c = (0.49 \sim 0.61)\sigma_c \quad (13)$$

3.3 工程地质与水文地质因素

由于围岩是一个复杂的结构体,其结构面对地下工程的稳定性将产生严重的影响。就岩爆而言,岩体的结构及结构上的各向异性对岩爆起控制作用,表现为不同结构面的岩体,其储存和释放的能量相差很大,文献[3]称之为岩体的“岩爆的结构效应”。当主节理与最大主应力夹角为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 时,储存与释放的能量较小,常产生剪切破坏,而不产生岩爆;当夹角为 $0^\circ \sim 20^\circ$ 时,储存能量的能力越强,产生岩爆越剧烈;当夹角为 $20^\circ \sim 30^\circ$ 或大于 45° 时,由于能量被结构面本身的永久变形所消耗,储存下来的弹性能量较少,即使产生岩爆,强度也不高。

岩爆的发生也与围岩的水文地质情况有关。相同岩性及构造的围岩,干燥的围岩比存在裂隙水的围岩更容易发生岩爆。这是因为结构面中的裂隙水使岩石的破裂强度降低,其储存与释放能量的能力比围岩处于干燥环境下低。

另外,岩爆还与地下空间的剖面形状,施工顺序,支护方式及爆破、地震有关,这些因素均表现为影响围岩的应力分布,或是当围岩处于临界平衡时,若发生动力扰动,即会促使围岩失稳。

4 岩爆的预测预报

由以上分析可知,产生岩爆的影响因素很多。虽然各判别准则都是建立在室内试验或现场调查的基础上,但仅凭一两个岩石指标就对岩体岩爆进行预测很不现实。因此,在预测岩爆时,有必要全面综合考虑这些因素。

众所周知,岩体是一种多相不连续介质,其工程力学行为及变形和破坏机制在主、客观两方面的相当程度上都是随机的,模糊的,即不确定的。更由于获取信息限制与数据的不完全、不充分、不确定,因此,通过经典的力学方法对其描述往往不具备条件^[17],对于岩爆尤其如此。冯夏庭教授开创的智能岩石力学在岩爆预测方面独树一帜,它撇开数学力学对岩体的精确描述,通过专家经验及工程实例,建立输出模式到输出模式的非线性映射,再通过网络推理识别岩爆发生的可能性及烈度。该方法综合考虑了各方面的因素,如岩石的性质、岩体结构、洞室结构、开挖和支护方式等等,是其它方法无法比拟的。采用智能岩石力学方法开发的综合智能系统成功地预测了南非金矿中的一些岩爆事件^[16,17]。

根据对一些岩爆事件的统计,岩爆一般发生在洞室开挖后几小时到几十小时,因此,洞室开挖过程中的岩爆监测预报对保证施工安全有重要的意义。

从岩爆发生的机制可知,岩爆发生的过程实际上是围岩应变能释放、应力重新分布的过程,可以通过对洞室的微地震事件(或声发射)的监测来反映能量释放过程^[18,19]。然而,现场监测表明,微地震事件的频度与岩爆事件并不存在对应的关系。文献[20]发现,地下洞室开挖过程中的微地震事件的位置分布具有分形特征,其分形维数与能量释放率间存在某种关系。用分形几何对岩爆描述为:岩爆实际上等效于岩体内破裂的一个分形集聚,这个破裂的分形集聚所需能量耗散 E 随分形维数 D 的减少而按指数率增加,即

$$D = C_1 \exp(-C_2 E) \quad (4)$$

如果将其监测结果采用分形几何进行处理,可以较准确地预报岩爆事件。

5 结 语

现有的研究表明,岩爆的产生过程是一个突变过程,可以通过尖点突变模型进行解释;岩爆

产生的最主要因素,包括岩石性质、围岩应力状态、水文与工程地质条件等;地下工程岩爆预测必须综合考虑各种相关因素。

随着能源地下储存、核废料深埋处理、深部矿产资源开采及高地应力地区的隧道建设等大量地下工程建设的发展,岩爆问题已成为岩石力学的焦点问题之一。深入分析岩爆发生机理、条件,提出岩爆的预测和控制方法,对于确保工程安全具有重要的意义。

参 考 文 献

- [1] 张梅英,李廷芥. 岩爆形成机理的细观力学实验分析[J]. 内蒙古工业大学学报, 16(3): 112-117.
- [2] 谭以安. 岩爆岩石断口扫描电镜分析及岩爆渐进破坏过程[J]. 电子显微镜学报, 1989, (2): 41-48.
- [3] 谭以安. 岩爆特征及岩体结构效应[J]. 中国科学 B 辑, 1991, 9(9): 985-991.
- [4] 王文星,潘长良. 现场岩爆发生条件探讨[J]. 西部探矿工程, 2002, 74(1): 54-56.
- [5] 唐礼忠,王文星. 一种新的岩爆倾向性指标[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 874-878.
- [6] 许东俊,章光. 岩爆的应力状态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 167-172.
- [7] 李长洪,蔡美峰. 岩石全应力-应变曲线及其与岩爆的关系[J]. 北京科技大学学报, 1999, 21(6): 513-515.
- [8] 冯涛,王文星,潘长良. 岩石应力松弛试验及两类岩爆研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2000, 15(1): 27-31.
- [9] 唐宝庆,曹平. 引起岩爆因素的探讨[J]. 江西有色金属, 1995, 9(4): 4-8.
- [10] 潘一山,章梦涛,李国臻. 洞室岩爆的尖角突变模型[J]. 应用数学和力学, 1994, 15(10): 893-900.
- [11] 费鸿禄,徐小荷,唐春安. 地下洞室岩爆突变理论研究[J]. 煤炭学报, 1995, 20(1): 29-33.
- [12] 钱伟长主编. 非线性力学的新发展 - 稳定性分叉突变混沌[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1988.
- [13] 冯涛,谢学斌. 岩石脆性及描述岩爆倾向的脆性系数[J]. 矿冶工程, 2000, 20(4): 18-19.
- [14] 陶振宇,潘别桐. 岩石力学原理与方法[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1991.
- [15] Wang J A, Park H D. Comprehensive prediction of rock burst based on analysis of strain energy in rocks [J]. **Tunneling and underground Space Technology**, 2001, 16: 49-57.
- [16] 冯夏庭. 地下洞室岩爆预报的自适应模式识别方法[J]. 东北大学学报, 1994, 15(5): 471-475.
- [17] 冯夏庭著. 智能岩石力学[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [18] Srinivasan C, Arora S K, Yaji R K. Use of mining and seismological parameters as premonitory of rockburst [J]. **Int. J. Rock Mech. Sci.**, 1997, 34(6): 1 001-1 008.
- [19] Mamsurov V A. Prediction of rockbursts by analysis of induced seismicity data[J]. **Int. J. Rock Mech. Sci.**, 2001, 38: 893-901.
- [20] 谢和平,Pariseau W G. 岩爆的分析特征和机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(1): 28-37.

上接第 668 页

- [3] 清华大学高坝大型结构国家专业实验室. “高拱坝设计与计算分析”高级研讨班论文集[R]. 北京: 清华大学, 2000.
- [4] 林皋,陈健云. 混凝土大坝的抗震安全评价[J]. 水利学报, 2001, (2): 8-15.
- [5] 黄运飞,冯静. 计算工程地质学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [6] 张伯艳,陈厚群,杜修力等. 拱坝坝肩抗震稳定分析[J]. 水利学报, 2000, (11): 55-59.
- [7] 张有天,周维垣. 三峡水利枢纽工程几个关键问题的应用基础研究丛书——岩石高边坡的变形和稳定[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.
- [8] 郭永刚,侯顺载,陈厚群等. 高拱坝伸缩横缝的开合对拱座岩体稳定的影响研究[J]. 水利学报, 2000, (12): 38-42.
- [9] 涂劲,侯顺载,陈厚群. 纵缝对重力坝地震反应影响的研究[J]. 水利学报, 2000, (12): 53-58.
- [10] 张建海,范景伟,胡定. 刚体弹簧元理论及其应用[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1997.
- [11] Zhou Weiyuan, Yang Ruoqiong. Rock Mechanics in China—Application of Computer Methods in Rock Mechanics[M]. New York: Science Press, 1995.
- [12] 张艳红,杜修力,张伯艳. 考虑介质随机性的结构—地基系统地震反应分析[J]. 水利学报, 2001, (1): 11-17.