

洞室岩爆机理的层裂屈曲模型^①

冯 涛^{1,2}, 潘长良²

(1. 湘潭工学院 资源工程系, 湘潭 411201; 2. 中南工业大学 资源环境与建筑工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 应用断裂力学原理讨论分析了岩体的断裂特征, 指出裂纹与自由边界发生相互作用可能引起裂纹的失稳扩展, 进而裂纹相互连接形成一长的薄片状岩层, 由此提出了岩爆发生机理的层裂屈曲模型。该模型认为岩爆的发生与分裂层屈曲断裂有关, 岩体分裂层屈曲断裂的最小长度 l_b 可以通过考虑板的稳定性来估算, 如果岩体分裂层足够长, 岩爆将实际发生。此外, 还指出岩体自由表面动力失稳型岩爆可用层裂屈曲模型来描述。

关键词: 岩爆; 屈曲; 岩爆机理; 断裂力学

中图分类号: TD31

文献标识码: A

岩爆所经历的物理过程是一个由微观断裂到突发的宏观尺度断裂过程。文献[1]的研究指出: 洞壁表面岩石弹射型岩爆破坏机制多为张拉脆性断裂, 属于一种低能量吸收断裂形式。

考虑洞室表面附近存在周向压应力, 当应力达到一定大小, 初始裂纹将会平行或偏向最大主应力的方向扩展, 如图 1 所示。Dyskin 和 Germanovich^[2]的研究认为, 这种情况下, 初始裂纹将以稳定的方式朝压缩方向产生分叉。随着载荷增加, 裂纹长度将相应增长。当裂纹增长时, 自由表面对裂纹扩展具有重要影响。在裂纹达到一定长度后, 自由表面的存在导致裂纹非稳定扩展, 从而使裂纹长度突然增长并使岩体分裂形成薄层。薄层的厚度取决于该初始裂纹与自由表面的距离。分裂层的长度由压应力集中区的长度决定, 如图 2 所示。

可以设想两种可能: 一是与分裂层厚度 h 相比, 如果应力集中区的长度 L 较大, 裂纹可能扩展很长的距离, 分裂层将变得薄而长并最后发生弯曲。可以推知, 分裂层的弯曲必将导致一个新的自由表面的产生, 这一过程的重复使岩层的突然断裂过程表现为岩爆。当然, 岩爆的强弱将取决于分裂层的厚度和应力集中的大小。第二, 如果应力集中区不足够大, 断裂不会直接发生。然而, 当应力水平不断增加, 在原先载荷作用下不发生扩展的初始裂纹则可能扩展, 并最终分离为若干薄层。随着后来的弯曲、失稳断裂, 岩石发生可称为散裂的冲击, 即岩爆。

在 Dyskin 和 Germanovich 的基础上, 李广平^[3]作了有益的探讨, 王敏强和侯发亮^[4]也考虑到了岩爆机理的板梁失稳力学模型。谭以安^[5]则更早地为岩爆板状破坏机理作了定性的描述。冯涛等人^[1]利用扫描电镜试验分析, 对岩爆岩石板状结构形成进行了研究。本文在综合上述研究的基础上, 明确提出并详细讨论岩爆层裂屈曲模型。

1 裂纹失稳扩展及薄片状岩层结构的形成

考虑初始裂纹长 $2a$, 且与压缩方向(σ_0)的夹角为 α , 如图 1 所示, 这是压应力作用下的斜裂纹为裂纹面承受剪切载荷时的 II 型裂纹问题, 其 II 型裂纹应力强度因子为

$$K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

式中 τ 为裂纹面的有效剪应力。

由线弹性断裂理论可知, II 型裂纹尖端邻近区域应力场的周向应力为

$$\sigma = \frac{K_{II}}{2\sqrt{2\pi r}} 3\cos\frac{\theta}{2}\sin\theta \quad (2)$$

根据王桂尧^[6]及 Saito^[7]等人的研究, 原裂纹开始张拉裂纹扩展以后, 根据能量守恒原理可求出驱动裂纹进一步扩展的压应力大小为

$$\frac{\sigma_0 \sqrt{\pi a}}{K_{Ic}} = (1+L)^{3/2} \cdot [(1-\lambda) \sqrt{1+\mu^2} -$$

① 基金项目: 国家“九五”科技攻关计划项目 95- 116- 01- 01- 02 和湖南省自然科学基金项目 JJY2032

收稿日期: 2000- 01- 14; 修订日期: 2000- 03- 01

作者简介: 冯 涛(1957-), 男, 博士, 副教授

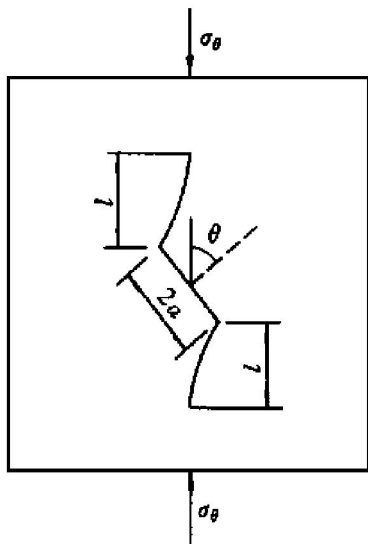


图1 裂纹扩展模型

Fig. 1 Schematic diagram for crack propagation

$$(1 + \lambda) \mu - 4.3 \lambda J^{-1} [0.23L + 1/\sqrt{3(1+L)}] J^{-1} \quad (3)$$

式中 $\lambda = \sigma_r / \sigma_0$, $L = l/a$, l 为裂纹扩展长度, a 为原裂纹半长。

由式(3)可见, σ_r 对裂纹的张拉扩展具有强烈的抑制作用, 这种抑制作用随着张拉裂纹的进一步扩展而不断加强。

因此, 洞室周边自由表面对裂纹生长有重要影响。由于压应力集中作用平行自由面, 扩展的裂纹也将平行于该面生长, 这已被 Nemat-Nasser 和 Horii^[8] 的实验证明。实际上, 一方面洞室围岩中裂纹位于洞室表面附近, 裂纹在自由表面的影响下, 可能引起失稳扩展; 另一方面, 随裂纹的扩展, 裂纹发生相互连接而形成更长的裂纹, 如图2(c), 由裂纹的失稳扩展或相互连接而形成一长的薄片状岩层。Dyskin 和 Germannovich^[2] 根据对偶渐进法给出:

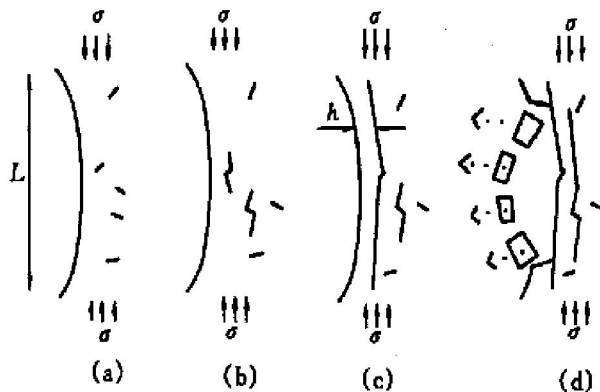


图2 岩爆机理的定性描述

Fig. 2 Qualitative description of mechanism of rockburst

$$K_I = \frac{F}{\pi c} + \frac{3Fl^{3/2}}{2h^2\sqrt{\pi}} = K_I^\infty \left[1 + \frac{3l^2}{2h^2} \right] \quad (4)$$

式中 $F = 2\sigma_0\beta(\alpha)a$, $\beta(\alpha) = c\sin^2\alpha\cos\alpha$, c 是二次裂纹影响参数, $K_I^\infty = F/\sqrt{\pi l}$ 是在无限大平面作用一对集中力的裂纹应力强度因子, 如图3所示。

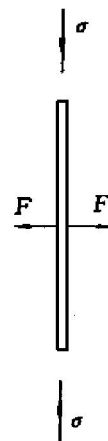


图3 压力作用下裂纹生长模型

Fig. 3 Model of crack growth

非稳定裂纹扩展在 K_I 的最小点起始, 也即是当裂纹长度满足下式时裂纹非稳定扩展。

$$l > l_{cr} = \frac{\sqrt{2}}{3}h = 0.471h \quad (5)$$

式中 l_{cr} 为临界裂纹长度。

用临界裂纹长度可计算临界裂纹应力:

$$\sigma_{cr} = \frac{2^{1/4}K_{Ic}\sqrt{3\pi h}}{8\beta_a} \quad (6)$$

综上所述, 当洞室周边切向应力集中区的范围和强度达到一定程度时, 初始裂纹将失稳扩展, 其扩展方向大致保持与最大主应力方向平行。失稳扩展的裂纹间相互连接, 使得岩体形成分裂的薄层, 该薄层的弯曲, 又为内部岩体中的裂纹重复上述过程、从而为在岩体中形成薄层状结构提供了新的自由表面。

2 层裂模型稳定性分析

分裂层产生弯曲的最小长度可以通过考虑薄板稳定性问题来研究。

我们知道, 薄板在纵向载荷作用下处于弯曲的平衡状态具有三种形式: 稳定的平衡状态、不稳定的平衡状态(又称失稳状态)和随遇平衡状态。在不稳定的平衡状态下, 板会继续快速的发生平衡位置的偏离(变弯)而丧失承载能力。这种现象称为薄板丧失稳定性, 又称薄板屈曲。

考虑工程实用性,将由裂纹扩展从围岩中分离出来的薄片状岩层的稳定性问题,简化成如图4所示的均匀受压板的稳定性问题。

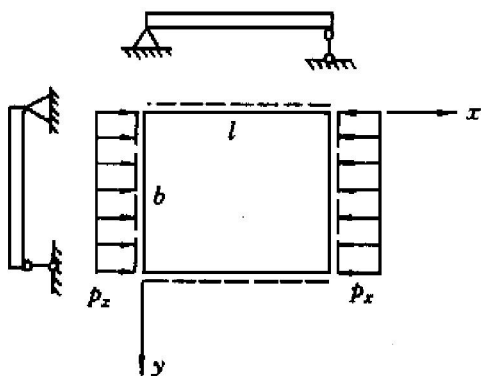


图4 岩板受压模型

Fig. 4 Model of layer as a plate under compression

设四边简支的矩形板,在 $x = 0, l$ 的两边上作用均匀分布的压力 P_x 。若板的各边允许在面内自由移动,在 x 方向变形时不产生其他方向的内力,即 $N_x = -P_x, N_y = N_{xy} = 0$ 。文献[9]给出薄板受纵横载荷作用下的弹性曲面微分方程为

$$D \nabla^2 w - \left[N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] = q \quad (7)$$

式中 D 是薄板的弯曲刚度, $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$ 。

由于只考虑纵向载荷所引起的内力,不涉及任何横向载荷,可令式(7)中 $q = 0$,得到如下的薄板屈曲微分方程:

$$D \nabla^4 w + P_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (8)$$

考虑到 w 沿 Y 方向无变化,四边简支板的边界条件为:

$$\text{当 } x = 0, l \text{ 时, } w = 0, \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0;$$

$$\text{当 } y = 0, b \text{ 时, } w = 0, \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} = 0。$$

同薄板小挠度弯曲问题一样^[9],挠度的表达式为

$$w = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} \sin \frac{m\pi x}{l} \sin \frac{n\pi y}{b} \quad (9)$$

该函数能够满足所有边界条件。现通过满足微分方程可以确定待定参数 A_{mn} 。将式(9)代入(8)式,得:

$$\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} A_{mn} = \left[\frac{m^4 \pi^4}{l^4} + 2 \frac{m^2 n^2 \pi^4}{l^2 b^2} + \frac{n^4 \pi^4}{b^4} - \frac{P_x m^2 \pi^2}{D l^2} \right] \sin \frac{m\pi x}{l} \sin \frac{n\pi y}{b} = 0 \quad (10)$$

满足此方程的解,必须使每一项系数为零,即

$$A_{mn} \left[\pi^4 \left(\frac{m^2}{l^2} + \frac{n^2}{b^2} \right) - \frac{P_x m^2 \pi^2}{D l^2} \right] = 0$$

使这个方程成立有两种可能:一是 $A_{mn} = 0$,这意味着在任何载荷下板都保持理想的平面挠度、零解,显然不是板的屈曲解;另一种可能是它的方括号项等于零,于是

$$\begin{aligned} P_x &= \frac{D l^2 \pi^2}{m} \left[\frac{m^2}{l^2} + \frac{n^2}{b^2} \right]^2 \\ &= \frac{D \pi^2}{b^2} \left[\frac{mb}{l} + \frac{n^2 l}{mb} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

临界载荷是指满足式(11)的最小载荷,所以 m, n 的取值必须使式(11)成为最小,则临界载荷

$$(P_x)_{cr} = \frac{4D \pi^2}{b^2} \quad (12)$$

考虑 $D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$, 临界应力

$$\sigma_{cr} = \frac{Eh^2 \pi^2}{3b^2(1-\mu^2)} \quad (13)$$

因此,洞室围岩中由裂纹分离出来的薄片状岩层在切向力作用下,岩层屈曲时的临界长度 l_b 为:

$$l_b = \pi h \sqrt{\frac{E}{3\sigma_{cr}(1-\mu^2)}} \quad (14)$$

满足此条件而发生宏观脆性断裂时将形成岩爆。

3 结论

用层裂屈曲模型描述洞室表面失稳型岩爆的发生机理与实际情况有较好的吻合。岩爆层裂屈曲模型的核心内容有三:一是围岩在切向力及自由表面的共同作用下裂纹非稳定扩展并形成大致平行于自由表面的板状结构;二是由于集中的切向力进一步作用,岩板屈曲断裂;三是围岩变形能转变为动能使发生岩板断块崩出或弹射等动力失稳现象。对岩爆动力源的初步研究认为,从岩爆动力源的形成与释放的角度可以将岩爆分为两种类型:一是洞室周边支承压力达到临界值时,岩体自由表面附近处的原有裂纹将突然迅速地失稳扩展,主控裂纹的失稳扩展,贯通形成板状结构,该结构在切向压力的进一步作用以及外界因素扰动下可能发生表面失稳而导致岩爆,本文是用层裂屈曲模型来描述这类岩爆的动力学机理。另一种是II型裂纹失稳扩展,断裂非稳定传播导致能量在时间上的非稳定释放和在空间上非均匀释放形成岩爆,这将在另文加以讨论。

REFERENCES

- [1] FENG Tao(冯涛), XIE Xuebin(谢学斌), PAN

- Changliang(潘长良), et al. 岩爆岩石断裂机理的电镜分析[J]. Journal of Central South University of Technology, 1999, 1: 14~ 17.
- [2] Dyskin A V and Germanovich L N. Model of rockburst caused by cracks growing near free surface [A]. Rockbursts and Seismicity in Mines [C]. Rotterdam: Balkema, 1993, 169~ 174.
- [3] LI Guang-ping(李广平). 岩爆的损伤断裂模型[J]. Rock and Soil Mechanics(岩土力学), 1997, 18(supp): 105~ 109.
- [4] WANG Min-qiang(王敏强) and HOU Fa-liang(侯发亮). 板状破坏的岩体岩爆判别的一种方法[J]. Rock and Soil Mechanics(岩土力学), 1993, 14(3): 53~ 59.
- [5] TAN Yi-an(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]. Journal of Electron Microscope (电子显微学报), 1989, 2: 41~ 48.
- [6] WAN Gui-yao(王桂尧). 隧洞岩爆机理与岩爆预测的断裂力学分析[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报), 1999, 9(4): 841~ 845.
- [7] Saito T, et al. Study on rockbursts at the face of a deep tunnel, the Kanetsu tunnel in Japan being an example [A]. Proc Fifth Int Congr On Rock Mech [C]. Melbourne 1983: D203~ 206.
- [8] Namaf Nasser S and Horii J. Compression induced non-planar crack extension with application to splitting, exfoliation, and rockburst [J]. J Geophys Res, 1987, B8: 6805~ 6821.
- [9] XU Zhi-lun(徐芝纶). Elasticity, Part 2(弹性力学, 下册)[M]. Beijing: Higher Education Press, 1982: 130.

Lamination spallation buckling model for formation mechanism of rockburst

FENG Tao^{1,2}, PAN Chang-Liang²

*1. Department of Resource Engineering, Xiangtan Polytechnic University,
Xiangtan, 411201, P. R. China;*

*2. College of Resource, Environment and Civil Engineering, Central South University of Technology,
Changsha China 410083, P. R. China*

Abstract: The feature of rock mass fracture was studied using fracture mechanics theory. It was made clear that the unstable propagation of cracks is caused by the interaction between cracks and free surfaces, and then thin layers of rock mass are formed as a result of linking of cracks. A lamination spallation buckling model for formation mechanism of rockburst was developed based on the above conclusion. The required minimum length of the layer (l_b) for buckling can be estimated by considering the layer as a plate. The rockburst will actually occur if the unstable growing crack which separates a layer is sufficiently long. The dynamic instability of free surfaces of rock mass can be described by the model.

Key words: rockburst; buckling; rockburst mechanism; fracture mechanics

(编辑 何学锋)