

基于自稳时变结构的岩爆动力源分析

王斌^{1, 2, 3}, 李夕兵¹, 马海鹏¹, 李志国¹

(1. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南科技大学能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 3. 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 将时变结构力学理论应用于岩爆发生机制的研究, 以一个新的角度对岩爆动力源进行分析。地下洞室的围岩存在具有承载能力的自稳结构, 首次提出了“自稳时变结构”的概念, 定性地分析了临近开挖洞室的围岩自稳时变结构的特点。应用质点系动量定理, 分析了围岩自稳时变结构的动力学响应。围岩自稳时变结构的质量随时间发生变化时, 系统会出现负阻尼的情况, 会形成动力不稳定系统而诱发岩爆。建立了围岩自稳时变结构诱发岩爆的力学模型, 由力学模型可得出岩爆发生的两个条件: ①围岩承受的切向应力 s_q 应使岩石产生扩容; ②围岩自稳时变结构的质量减少。研究表明: 岩爆的发生机制可通过围岩自稳时变结构理论得到很好的解释。

关键词: 自稳时变结构; 岩爆; 负阻尼; 动力响应

中图分类号: TU457; U451 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2010)01-0012-06

作者简介: 王斌(1975-), 男, 广东梅县人, 讲师, 博士研究生, 从事采矿与岩石力学研究。E-mail: wb21c@sina.com.cn。

Energy source of rockburst based on self-sustaining time-varying structures

WANG Bin^{1, 2, 3}, LI Xi-bing¹, MA Hai-peng¹, LI Zhi-guo¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 3. Hunan Key Laboratory of Safe Mining Technique of Coal Mines, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The time-varying structure theory is applied to the researches on the mechanism of rockburst, the energy source of which is analyzed from a new angle. There are self-sustaining bearing structures in the surrounding rock of underground cavern. Furthermore, the concept of self-sustaining time-varying structure is put forward firstly, and the characteristics of the self-sustaining time-varying structures near the underground cavern are analyzed qualitatively. Applying the particle system momentum theorem, the dynamic response of the self-sustaining time-varying structures is calculated. The results indicate that the change of structural mass with time can supply negative damping which can cause dynamic instability and thus induce rockburst. A mechanical model is established to explain how the self-sustaining time-varying structures induce rockburst, if satisfying the two conditions: one is rock dilatancy under tangential stress s_q in the surrounding rock, the other is mass decrease of the self-sustaining time-varying structures. The researches indicate that the mechanism of the rockburst happening in underground engineering can be interpreted well by the time-varying structure theory.

Key words: self-sustaining time-varying structure; rockburst; negative damping; dynamic response

0 前言

岩爆是地下采矿和隧道工程中的一种人工地质灾害, 具有围岩突然、猛烈地向开挖空间弹射、抛掷、喷出以及洞壁片状剥落的特征, 严重地威胁着地下结构、人员和设备的安全^[1]。岩爆研究大致可以分为实录、发生机制、超前预报及控制技术4大领域, 其中, 建立在工程实录基础上的发生机制研究是所有研究工作的核心, 也是超前预报及控制技术发展的基础。鉴于岩爆发生机制的重要性, 国内外学者对此从强度、刚度、能量、变形失稳、损伤、突变等不同角度进行

了大量研究, 得到了许多有益的结论。从致因看, 岩爆源可以分为两大类: ①岩爆源在岩爆岩体本身, 受到岩石结构形式、围岩受力状态和演化过程的控制; ②岩爆源在外部, 如爆破震动、开采等, 使岩体原岩应力和外部扰动应力叠加而发生的岩爆。前者以岩石准静力学理论为基础, 相关研究较多, 其中以剩余能

基金项目: 国家自然科学基金项目(50934006, 10872218, 50774032);
高校博士点专项基金(20060533011)

收稿日期: 2008-10-07

量理论占主导地位; 后者在前者的基础上引入岩石动力学理论也展开了一些研究。Mueller^[2]认为, 岩爆是在岩体的静力稳定条件被打破时发生的过程, 利用有限元法和动力有限差分法, 通过先求解围岩初始静力问题, 然后在边界上叠加动力干扰的方法, 对岩爆过程进行过数值模拟研究。左宇军等^[3]根据洞室层裂曲岩爆在准静态破坏条件下的演化规律, 建立了动力扰动下洞室层裂曲岩爆的非线性动力学模型。可见, 后者的岩石动力学问题已引起众多学者的关注, 但前者的动力学问题研究较少。

1 岩爆问题的时变性

岩爆是人工开挖诱发的一种人为事件, 尽管岩爆受到围岩岩性及地应力等背景条件的控制, 但如果岩石不被挖走, 岩体还会安然无恙地处在地下深处。地下洞室形成后破坏了岩体原始的应力平衡状态, 受力状态由三轴转变为单轴或双轴状态, 切向应力 σ_θ 加载, 而径向应力 σ_r 卸载。岩爆发生表明围岩岩体破坏, 其重要的特征之一是其切向应力的峰值会从围岩临空面向岩体内部跃迁。

工程实例表明, 这种应力的跃迁与岩爆的发生有密切联系, 可能成为岩爆发生的动力源。侯发亮等^[4]早就指出, 洞室埋深较大, 即使没有构造应力, 由于上覆岩体效应, 洞室可能会发生岩爆。卢文波等^[5]的初步研究表明, 高地应力条件下开挖荷载瞬态加卸荷诱发的振动占到围岩总体振动响应的很大部分, 因而可能诱发岩爆。结合文献[6]岩爆应力演化模型, 可得出圆形洞室的切向应力的峰值跃迁情况, 如图1。

现有岩爆发生机制的研究基本是针对开挖后的稳定状态IV展开, 也就是开挖后应力场调整的最终结果, 而较少关注应力由初始状态II跃迁到中间状态III, 再由中间状态III跃迁到稳定状态IV时围岩的动态响应。由图1可以看出, 应力跃迁过程中, 围岩系统的内部参数如几何形状(围岩变形导致)、岩石物理力学特性(高应力状态岩石脆性向延性的过渡)、边界状态(围岩破裂区和弹性区的边界)等, 都在随时间发生变化。而现有岩爆机制研究是基于不变边界系统的传统静(动)力学, 因此还不能阐明岩爆的全部机理。随着时变结构力学的兴起, 从变边界变区域的角度研究采矿工程的复杂问题受到广泛重视, 由于时变结构力学强调结构内部参数随时间变异, 因而成为研究采矿工程中复杂力学问题的有效途径^[7]。

本文从围岩自稳结构分析着手, 将时变结构力学理论应用于岩爆发生机制的研究, 从一个新的角度对岩爆动力源进行讨论。

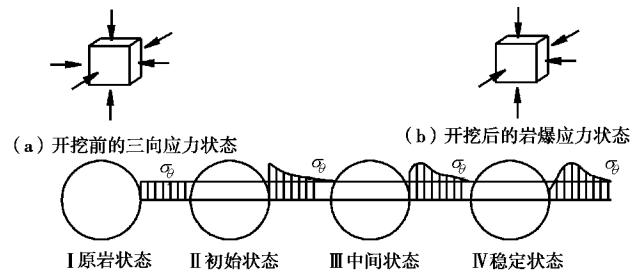


图1 岩爆切向应力演化模型

Fig. 1 Tangential stress evolution model of rockburst

2 时变结构的动力响应分析

数百年的力学学科发展历史形成一系列学科分支, 但绝大部分学科分支研究对象的几何、物理、边界参数不随时间变化。凡力学研究对象随时间发生变化(其变化在研究时段内足以影响力学状态), 则将涉及共同的时变力学基础^[8]。时变力学是一个崭新研究方向, 是现代力学的一个重要分支, 它的控制方程是变系数数理方程。考虑结构体系的时变性, 时变结构体系的振动方程一般可表示为

$$[M(t)]\{\ddot{X}(t)\} + [C(t)]\{\dot{X}(t)\} + [K(t)]\{U(t)\} = \{F(t)\}, \quad (1)$$

式中, $[M(t)]$, $[C(t)]$, $[K(t)]$ 分别为与时间有关的结构质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵, $\{F(t)\}$ 和 $\{U(t)\}$ 分别为结构的荷载与响应。如果结构体系中的时变参数随时间改变较为明显时, 式(1)称为强时变振动方程, 而当其时变性不显著时, 称为弱时变振动方程^[9]。

令 $\{X(t)\} = \{U(t), \dot{U}(t)\}^T$, 则式(1)可写为

$$\{\ddot{X}(t)\} = [A(t)]\{X(t)\} + [B(t)]\{F(t)\}, \quad (2)$$

式中, $[A(t)] = \begin{bmatrix} 0 & I_n \\ -[M(t)]^{-1}[K(t)] & -[M(t)]^{-1}[C(t)] \end{bmatrix}$,

$$[B(t)] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & [M(t)]^{-1} \end{bmatrix}, \quad I_n \text{ 为 } n \text{ 阶方阵}.$$

式(2)为 n 个自由度时变体系振动问题的状态方程, $\{X(t)\}$ 为体系的状态向量, 可描述结构体系的动力响应。当考虑结构参数 $[A(t)]$ 仅为时间的函数时, 首先可求出与式(2)相应的齐次时变方程的解, 即方程 $\{\ddot{X}(t)\} = [A(t)]\{X(t)\}$ 的解为

$$\{X(t)\} = F(t, t_0)\{X(t_0)\}, \quad (3)$$

式中, $F(t, t_0)$ 是 n 阶非奇异方阵, 称为时变转移矩阵, 它满足 $F(t, t_0) = [A(t)]F(t, t_0)$ 且 $F(t_0, t_0) = I_n$ 。

为了求非齐次时变方程(2)的解, 令方程的解为

$$\{X(t)\} = F(t, t_0)\{X(t)\}, \quad (4)$$

则

$$\{\ddot{X}(t)\} = F(t, t_0)\{\ddot{X}(t)\} + F(t, t_0)\{\dot{X}(t)\}$$

$$= [A(t)]F(t, t_0)\{X(t)\} + F(t, t_0)\{\dot{X}(t)\} \quad (5)$$

将式(4)代入式(5), 得

$$\{\ddot{X}(t)\} = [A(t)]\{X(t)\} + F(t, t_0)\{\dot{X}(t)\} \quad (6)$$

比较式(2)和式(4), 对 $\{\ddot{X}(t)\}$ 积分, 可得

$$\{X(t)\} = \{X(t_0)\} + \int_0^t F^{-1}(t, t_0)[B(t)]\{F(t)\}dt \quad (7)$$

对于初始条件 $t=t_0$, 由式(4)可得 $\{X(t_0)\}=\{X(t_0)\}$, 同时 $F^{-1}(t_1, t_0)=F(t_0, t_1)$, 将式(6)中 $\{X(t_0)\}$ 替换为 $\{X(t_0)\}$, 再代入式(4), 可得式(2)的通解为

$$\{X(t)\} = F(t, t_0)\{X(t_0)\} + \int_{t_0}^t F(t, t)[B(t)]\{F(t)\}dt \quad (8)$$

式中, 右边第一项为初始状态的时变位移, 即为初始条件引起的自由振动, 第二项则为外荷载 $\{F(t)\}$ 产生的结构振动响应。

3 围岩自稳时变结构的分析

3.1 围岩自稳时变结构的提出

巷道围岩自稳结构是客观存在的。钱鸣高认为, 洞室开掘后, 洞室空间上方岩层的重量将由洞室支架与洞室周围岩体共同承担, 从总的规律看, 洞室上覆岩体的重量由洞室支架承担的仅占1%~2%, 其余的完全由洞室周围岩体承受^[10]。这说明, 洞室围岩存在着某种形式的自稳结构。众多的工程实例还表明, 软弱节理岩石不具有岩爆倾向性, 岩爆多数发生在石英岩、花岗岩、正长岩、闪长岩、花岗闪长岩、大理岩、片麻岩等坚硬岩体中。这些岩体的共同力学特性是岩石单轴抗压强度大, 多数超过100 MPa^[11], 因而具备了形成洞室围岩自稳结构的条件。岩爆岩体另一个特性是表现为脆性, 即达到峰值强度后, 岩石急剧断裂。根据图1, 切向应力的初始状态Ⅱ也是围岩自稳结构的最初状态, 这种状态如果能存在, 表明围岩没有发生断裂破坏。然而, 高应力条件下, 围岩体断裂是必然的, 如果围岩体断裂急剧, 围岩切向应力的跃迁也是急剧的。围岩自稳结构边界会发生改变, 围岩每发生一次断裂, 将导致自稳结构边界的调整或变迁。从岩爆岩体物理性质的角度, 其脆性岩体在深部高应力条件下会转变为延性, 但在开挖卸荷条件下又由延性向脆性转化, 对于远离开挖洞室的岩体又会由脆性转化为延性^[12]。可见, 围岩自稳结构的边界、力学特性是随时都在变化的, 按文献[13]的观点, 将这种内部参数(包括几何形状、边界状态、物理特性等)随时间发生变化的结构称为“时变结构”。

本文的研究对象主要集中在开挖洞室周边的围岩, 结合岩爆动力源研究, 首次提出“围岩自稳时变结构”的概念, 认为岩爆是满足某种条件下围岩自稳

时变结构调整的过程。

3.2 围岩自稳时变结构的分布

深埋巷道开挖产生应力重分布, 当次生应力场满足岩体破坏条件时, 应力释放, 深部岩体产生第一次破裂区。对于浅部岩体由于地应力水平低, 在应力释放后不可能再产生第二次破裂区, 康红普^[14], 陈学华等^[15]等提出破裂区和弹性区的岩体构成控制围岩整体承载能力的承载结构, 称为“关键圈”或“关键层”。对于深部岩体, 其主要特点是地应力高, 因此, 应力释放后产生的第一次破裂区的外边界相当于新的开挖边界, 这样应力再一次重分布, 并且当重分布应力场满足岩体破坏条件时, 应力再一次释放, 产生第二次破裂区, 依次类推, 直到应力释放后不能再产生破裂区为止, 这就是在深部岩体的分区破裂化现象^[16-17]。这里将“关键圈”的承载结构理论扩展, 可认为以各不破裂区为边界, 弹性未破裂区和破裂区岩石构成一个深部围岩自稳子结构, 结合时变理论, 即可称为“围岩自稳时变结构”。

图2是为人所熟知的深部岩体分区破裂化的示意图, 本文用以说明围岩自稳时变结构的分布, 图中粗实线为每个自稳时变结构的时变边界。围岩结构的形成与岩性、施工方法等多种因素有关, 图2是一种典型的情况。此种情况下, 岩爆发生前, 围岩主断裂路径平行于最大主应力, 形成平行于洞壁自由面的板状劈裂, 裂纹扩展(图2中平行于洞壁自由面的虚线)贯穿后形成的岩板。文献[18]在仅考虑静水压力的情况下, 分析了圆形巷道分区破裂的半径。

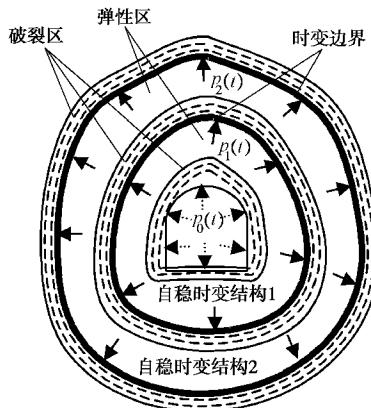


图2 围岩自稳时变结构分布

Fig. 2 Distribution of self-sustaining time-varying structures

对于第二个破裂区, 第一个破裂区的外边界即是求解弹性区的边界, 存在一与时间有关的边界应力 $p_i(t)$, 依此类推。 $p_0(t)$ 在 $t=0$ 未开挖时等于地应力, $t=t_0$ 开挖完成时 $p_0(t)=0$ 。设开挖扰动后的二次应力场为弹性的, 则可分为 $p_i(t)$ 和原岩应力场 q 两部分求解巷道围岩二次应力场 s_q 和 s_r , 同时假设岩石破坏满足Mohr-Coulomb准则, 可得

表1 破裂区数量及宽度

Table 1 Number and width of fractured zone

破裂区 数量	$s_c=100$ MPa	$s_c=90$ MPa			$s_c=80$ MPa			$s_c=60$ MPa		
		R_0/m	R_1/m	$(R_1-R_0)/m$	R_0/m	R_1/m	$(R_1-R_0)/m$	R_0/m	R_1/m	$(R_1-R_0)/m$
1		4.000	4.463	0.463	4.000	4.650	0.646	4.000	4.965	0.965
2	无	5.753	6.116	0.363	4.800	5.325	0.525	4.983	5.958	0.975
3		7.313	7.313	0	5.704	5.768	0.064	6.401	6.109	0.068
4					0.602	0.602	0	0.652	0.652	0

注: s_c 为岩石抗压强度。

$$\left. \begin{aligned} s_q &= s_{qp(t)}(r, t) + q\left(1 + \frac{r_0^2}{r^2}\right), \\ s_r &= s_{rp(t)}(r, t) + q\left(1 - \frac{r_0^2}{r^2}\right), \\ s_q - s_r &= 2(c_0 \cot j + s_r) + \frac{\sin j}{1 - \sin j}, \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中, r_0 为圆形洞室的半径, r 为围岩与圆形洞室圆心的距离; j 为岩石的内摩擦角, c_0 为岩石的黏聚力, $s_{qp(t)}$ 和 $s_{rp(t)}$ 是由边界应力 $p_i(t)$ 引起与 r 和时间有关, 详见文献[18]。

由式(9)可得破裂区的破裂区的内边界 R_0 、外边界 R_1 及破裂区发生的时刻 t 。表1^[18]为圆形巷道 $r_0=4$ m, $p_0(t=0)=q=100$ MPa, 泊松比 $\mu=0.1$, $E=2000$ MPa, $r=2300$ kg/m³, $j=18^\circ$, 开挖用时 100 s 时, 不同岩石抗压强度条件下围岩破裂区的数量和宽度。

由以上分析, 洞室围岩岩性、地应力、开挖工艺决定围岩自稳时变结构数量。对于某种岩石, 当洞室所处地应力低时, 其周边的围岩自稳时变结构数量仅为一个; 当洞室所处地应力高时, 围岩自稳时变结构数量会超过一个, 各自稳时变子结构的岩体厚度也是不一样。

3.3 围岩自稳时变结构的动力学特征

考虑时变结构的复杂性, 为了方便分析围岩自稳时变结构调整时可能诱发岩爆的机制, 同时地下围岩空间结构可以简化为平面应变问题, 可将围岩自稳时变结构视为单自由度非周期时变体系, 选取体系中的典型质点(如体系外形的几何中心、体系在初始时刻的质心)进行分析。

设在时刻 t , 质点的质量为 $m(t)$, 速度为 $v(t)$, 则 t 时刻体系的动量为 $m(t)v(t)$ 。若体系的质量随时间递减, 则在时刻 $t+dt$ 质量为 $m(t)-|dm|$, 速度为 $v+dv$, 而放出的单元质量 dm 的绝对速度设为 u , 则在 $t+dt$ 时刻体系的动量为 $[m(t)-|dm|](v+dv)+u|dm|$, 故由质点系动量定理可得

$$\{[m(t)-|dm|](v+dv)+u|dm|\}-mv = [P(t)-D(t)v(t)-K(t)X(t)]dt, \quad (10)$$

式中, $[X(t)]$, $[K(t)]$, $[D(t)]$ 分别为体系在 t 时刻的位移、刚度、阻尼, 而 $[P(t)]$ 则为体系在 t 时刻所受的外荷载。

略去高阶微量, 并注意到 dm/dt 为负, 则得单自

由度时变体系强迫振动的一般方程^[19]:

$$\begin{aligned} m(t) \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + \frac{dm(t)}{dt} \left[\frac{d X(t)}{dt} - u(t) \right] + \\ D(t) \frac{d X(t)}{dt} + K(t) X(t) = P(t), \end{aligned} \quad (11)$$

当体系的质量随时间增加时, 亦可推得运动方程为式(11)。对于自由振动的情形, 令 $[P(t)]=0$; 同时在弹脆性场中不计阻尼影响, 则令 $[D(t)]=0$; 很多情况下, $u(t)$ 相对于 $v(t)$ 即 $\frac{d X(t)}{dt}$ 是很小的, 可令 $u(t)=0$, 从而得到

$$m(t) \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + \frac{dm(t)}{dt} \frac{d X(t)}{dt} + K(t) X(t) = 0. \quad (12)$$

和式(1)进行比较, 式(12)中的 $dm(t)/dt$ 相当于粘滞阻尼系数。 $dm(t)/dt$ 有以下两种情形: ①当质量随时间增加时, $dm(t)/dt > 0$, 则此体系相当于具有正阻尼, 当 $dm(t)/dt$ 很大时, 体系不可能发生自由振动; ②当质量随时间递减时, $dm(t)/dt < 0$, 则此体系相当于具有负阻尼, 此时体系可能发生振幅不断增长的自由振动。

在地下洞室问题中, 岩爆的产生与开挖后围岩的动力失稳有关, 通过以上分析, 时变体系的质量随时间发生变化时, 会使体系的动力学响应产生很大影响, 当质量随时间递减, 会形成动力不稳定系统(系统有负阻尼), 也就是 $dm(t)/dt < 0$ 可能诱发岩爆。因此通过确定结构体系质量的增减为研究岩爆的发生提供了一种新的思路。如果从地下洞室形成至地表这个大范围的岩体来说, 岩体不存在质量的增减。但靠近开挖洞室会形成若干个自稳时变结构, 就围岩自稳形成的这些小结构来说, 单个自稳结构体系可能会出现质量的增减。因此可以认为, $dm(t)/dt < 0$ 可成为诱发岩爆的条件。岩石的扩容效应使得围岩膨胀, 这要求围岩有膨胀空间, 或称为体积补偿空间, 故可建立图3所示的力学模型来分析岩爆发生。

该力学模型说明, 如果忽略微裂隙和节理的影响, 补偿空间的位置应该在各时变结构的接触边界处和洞室的自由面两个地方。这两处的岩体(图3中的斜线阴影部分)为单轴或双轴状态或所受围压较小, 较其它位置的岩体更容易发生破坏, 也就是存在使结构体系质量增减的 dm 和 dm' 。临近洞室的自由面岩体 dm' 和时变结构边界的岩体 dm 的破坏程度是不一样的, dm' 岩体

在高应力作用下, 易局部完全失去承载能力, 脱离时变结构1, 使时变结构1成为动力不稳定系统, 同时围岩应力峰值由自由面向岩体内部跃迁, 即图1中初始状态II和中间状态III的应力跃迁; dm 岩体虽破坏, 但仍有部分承载能力, 会脱离时变结构1而成为时变结构2的一部分, 时变结构2的承载能力加强, 而时变结构1成为动力不稳定系统, 一旦其质量参数变化迅速或有外部扰动, 会伴随剧烈振动, 从而导致岩爆。

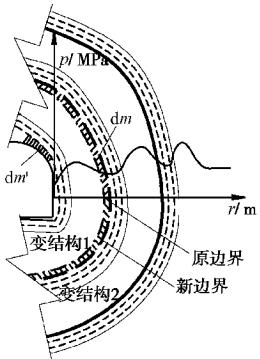


图3 时变结构诱发岩爆的力学模型

Fig. 3 Mechanical model of rockburst induced by time-varying structures

根据前面的分析, 由力学模型可得出岩爆发生的条件: ①考虑到开挖洞室形成的二次应力场分布中切向应力 s_θ 加载, 故认为围岩承受的切向应力 s_θ 应使岩石产生扩容, 即满足 $s_\theta > s_{扩容}$, 式中 $s_{扩容}$ 为岩石开始出现扩容时的应力, 需通过岩样实验确定; ②围岩自稳时变结构质量减少, 即 $dm(t)/dt < 0$ 。条件①是岩爆发生的充分条件, 条件②是岩爆发生的必要条件。条件②还可以判别岩爆发生的强度, 这取决于岩体的脆性和施工工艺, 如脆性强的岩体或爆破掘进时, 其质量参数变化迅速, 产生的负阻尼大, 岩爆更强烈。两个条件说明岩爆的动力源可来自于围岩自身的受力状况和岩性, 在不需要外力干扰的情况下, 也会发生岩爆。

围岩时变结构诱发岩爆力学条件可以很好地解释许多岩爆现象。岩爆发生并不仅仅是深部条件才会遇到的问题, 文献[11]比较国内外二十几个岩爆隧道实例发现, 岩爆在700 m以上埋深的情况发生居多, 200 m左右也有发生岩爆的实例, 这说明, 因围岩自稳时变结构的影响, 更重要的是取决于其岩体所处的应力状态, 故应重视地应力测试。一般而言, 只有硬质岩石才可能发生岩爆, 排除各洞段所处的地应力水平及地质等外部原因, $dm(t)/dt$ (取决于岩石的脆性)也同样对岩爆有着重要的影响, 例如煤的强度并不高, 却经常可以发生煤爆, 究其原因, 主要是其脆性较大决定的, 即其自稳时变结构质量参数变化迅速。雪峰山隧道岩石硬度虽然很大, 但由于其年代较老, 经历了多次构造运动, 韧性剪切特征明显, 故其脆性相对稍弱, 致使其发生岩爆的可能性降低^[22]。另外, 岩爆

的发生具有滞后性^[6], 即洞室开挖后经过一段时间发生岩爆, 这不仅是围岩时变结构承载能力的体现, 同时也是围岩时变结构调整诱发岩爆例证。

4 结 论

(1)开挖洞室的围岩存在具有承载能力的自稳结构, 自稳结构在一定条件下伴随结构内部参数(包括几何形状、物理特性、边界状态等)的改变, 具有时变性。首次提出了“围岩自稳时变结构”的概念, 定性分析了靠近开挖洞室的围岩自稳时变结构的特点。

(2)将围岩自稳时变结构简化为平面应变问题, 视为单自由度非周期时变体系, 应用质点系动量定理, 分析了围岩自稳时变结构的动力学特征。结果表明, 围岩自稳时变结构的质量随时间发生变化时, 系统会出现负阻尼的情况, 形成动力不稳定系统。

(3)建立了围岩自稳时变结构诱发岩爆的力学模型, 由力学模型可得出岩爆发生的两个条件, 说明岩爆的动力源可来自于围岩自身的受力状况和岩性, 从一个新的角度阐释了岩爆动力源。由于时变结构力学理论是近几年才逐步发展起来的新理论, 本文将其应用于岩爆问题的研究还仅是探索性的尝试, 判别岩爆的条件还需进一步试验总结和修正, 希望能抛砖引玉, 促进相关问题的深入研究。

参考文献:

- [1] 沈明荣, 陈建峰. 岩体力学[M]. 上海: 同济大学出版社, 2006. (SHEN Ming-rong, CHEN Jian-feng. Rock mass mechanics[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2006. (in Chinese))
- [2] MUELLER W. Numerical simulation of rock bursts[J]. Mining Science & Technology, 1991, 12: 27 - 42.
- [3] 左宇军, 李夕兵, 赵国彦. 洞室层裂屈曲岩爆的突变模型 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2005, 36(2): 311 - 316. (ZOU Yu-jun, LI Xi-bing, ZHAO Guo-yan. A catastrophe model for underground chamber rock burst under lamination spallation buckling[J]. J Central South University (Science and Technology), 2005, 36(2): 311 - 316. (in Chinese))
- [4] 侯发亮, 刘小明, 王敏强. 岩爆成因再分析及烈度划分探讨[C]// 第三届全国岩石动力学学术会议论文集. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1992: 523 - 537. (HOU Fa-liang, LIU Xiao-ming, WANG Min-qiang. Discussion on mechanism and intensity classification of rockburst[C]// Proceedings of the Third China Rock Dynamic Mechanics. Wuhan: Wuhan Technical University of Surveying and Mapping Press, 1992: 523 - 37. (in Chinese))
- [5] 卢文波, 陈明, 严鹏, 等. 高地应力条件下隧洞开挖诱发围岩振动特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007,

- [26(增1): 3329 - 3334. (LU Wen-bo, CHEN Ming, YAN Peng, et al. Study on vibration characteristics of surrounding rock induced by tunnel excavation under high in-situ stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3329 - 3334. (in Chinese))]
- [6] 何满潮, 苗金丽, 李德建, 等. 深部花岗岩试样岩爆过程实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 865 - 877. (HE Man-chao, MIAO Jin-li, LI De-jian, et al. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 865 - 877. (in Chinese))]
- [7] 马占国, 黄伟, 郭广礼, 等. 覆岩失稳破坏的时变边界力学分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(4): 515 - 517. (MA Zhan-guo, HUANG Wei, GUO Guang-li, et al. Analysis on failure of covering rock in Ehuobulake Mine by using mechanics of systems with variable boundaries[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2006, 25(4): 515 - 517. (in Chinese))]
- [8] 曹志远, 邹贵平, 唐寿高. 时变动力学的 Legendre 级数解[J]. 固体力学学报, 2000, 21(2): 102 - 108. (CAO Zhi-yuan, ZOU Gui-ping, TANG Shou-gao. Solution of time-variation dynamic problem by Legendre polynomials[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2000, 21(2): 102 - 108. (in Chinese))]
- [9] 管昌生. 随机时变结构动力可靠度分析的 Markov 模型[J]. 武汉工业大学学报, 2000, 22(2): 48 - 50. (GUAN Chang-sheng. Markov model on analysis of random time dependent structural dynamic reliability[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2000, 22(2): 48 - 50. (in Chinese))]
- [10] 钱鸣高, 石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003. (QIAN Ming-gao, SHI Ping-wu. Mining pressure and strata control[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2003. (in Chinese))]
- [11] 张志强, 关宝树, 翁汉民. 岩爆发生条件的基本分析[J]. 铁道学报, 1998, 20(4): 82 - 85. (ZHANG Zhi-qiang, GUAN Bao-shu, WEN Han-ming. Basic analysis of rock bursting occurrence condition[J]. Journal of China Railway Society, 1998, 20(4): 82 - 85. (in Chinese))]
- [12] HE M C. Rock mechanics and hazard control in deep mining engineering in China[C]// Proceedings of the 4th Asian Rock Mechanics Symposium. Singapore: World Scientific Publishing Co., Ltd., 2006: 29 - 46.
- [13] 王光远. 论时变结构力学[J]. 土木工程学报, 2000, 3(6): 105-108. (WANG Guang-yuan. On mechanics of time-varying structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 3(6): 105 - 108. (in Chinese))]
- [14] 康红普. 巷道围岩的关键圈理论[J]. 力学与实践, 1997, 19(1): 34 - 36. (KANG Hong-pu. Key circle theory of roadway surrounding rock[J]. Mechanics in Engineering, 1997, 19(1): 34 - 36. (in Chinese))]
- [15] 陈学华, 沈海鸿, 王善勇. 巷道围岩自稳结构原理及其影响因素研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2002, 21(3): 261 - 263. (CHEN Xue-hua, SHEN Hai-hong, WANG Shan-yong. The research on theory and influence factors of self-sustaining structure of roadway surrounding rock[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2002, 21(3): 261 - 263. (in Chinese))]
- [16] ADAMS C R, JAGER A J. Petroscopic observations of rock fracturing ahead of stope faces in deep-level gold mines[J]. Journal of South African Institute of Mining and Metallurgy, 1980, 80(6): 204 - 209.
- [17] 钱七虎. 深部岩体工程响应的特征科学现象及“深部”的界定[J]. 东华理工学院学报, 2004, 27(1): 1 - 5. (QIAN Qi-hu. The characteristic scientific phenomena of engineering response to deep rock mass and the implication of deepness[J]. Journal of East China Institute of Technology, 2004, 27(1): 1 - 5. (in Chinese))]
- [18] 周小平, 钱七虎. 深埋巷道分区破裂化机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 877 - 885. (ZHOU Xiao-ping, QIAN Qi-hu. Zonal fracturing mechanism in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 877 - 885. (in Chinese))]
- [19] 李桂青, 李秋胜. 工程结构时变可靠度理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001. (LI Gui-qin, LI Qiu-shen. Theory and application of engineering structure time-varying reliability[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese))]
- [20] 陈宗基, 康文法. 在岩石破坏和地震之前与时间有关的扩容[J]. 岩石力学与工程学报, 1983, 2(1): 11 - 21. (TAN Tjongkie, KANG Wen-fa. Time-dependent dilatancy prior to rock failure and earthquakes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1983, 2(1): 11 - 21. (in Chinese))]
- [21] 李长洪, 蔡美峰, 乔兰, 等. 岩石全应力 - 应变曲线及其与岩爆关系[J]. 北京科技大学学报, 1999, 21(6): 513 - 515. (LI Chang-hong, CAI Mei-feng, QIAO Lan, et al. Rock complete stress-strain curve and its relationship to rock burst[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1999, 21(6): 513 - 515. (in Chinese))]
- [22] 马亢, 徐进, 王兰生, 等. 雪峰山公路隧道岩爆问题的分析预测研究[J]. 公路, 2008, 1(1): 204 - 208. (MA Kang, XU Jin, WANG Lan-sheng, et al. Research on prediction of rockburst problem of Xuefeng Mountain highway tunnel[J]. Highway, 2008, 1(1): 204 - 208. (in Chinese))]