

可储能原则在一类岩爆问题中的研究和应用

秦剑峰*, 卓家寿

(河海大学 土木工程学院, 南京 210098)

摘要:从能量的角度对一类岩爆问题——应变型岩爆进行一些探讨。对此类岩爆能量的来源、能量的去处及能量释放的原因和大小进行了完整的论述。提出了岩体的可储能原则——岩体可存储的能量并非定值,而是随应力状态的变化而改变,当应力发生突变,岩体内实际存储的能量大于可储能时,多余的能量必将以各种形式瞬间释放,其中包括动能。根据此准则对简化了的一维、三维模型进行了详细的分析和计算,并结合离散元软件 3DEC 再现了三维卸载岩爆的破坏过程。

关键词:岩爆;能量;可储能;应力

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

1 引言

自 18 世纪英国首次报道了岩爆现象,各国学者一直对其进行孜孜不倦的研究。从原先的静力研究到如今的动静载研究;从强度、刚度角度研究到能量角度研究,提出了很多岩爆产生机理和研究方法,但任何一种单一的理论都不能准确地解释所有岩爆,甚至至今连准确地对岩爆进行定义和分类都很困难^[1]。其中主要因素是对岩石破坏理论的研究跟不上,直到上世纪库克才用刚性加载的方式得到应力-应变的全曲线。一直以来更多的研究集中在加载破坏方面,对卸载破坏这种只有在高地应力的地下工程中才经常遇到的破坏形式没有系统研究。同时岩爆这种破坏形式本身受很多因素的影响,在其研究过程中涉及地质学、岩土力学、断裂力学、热力学、波动理论等很多科学分支。以上特点造成对岩爆研究的诸多困难。由于能量理论独特的优点是标量而不是矢量,其在对岩爆研究中已经越来越被大家广泛接受^[2-4]。但这类文章几乎都是先在有限元体系下进行计算,然后将所得到的应力结果通过已有的或新发展的公式改写为能量判别式,最终判断岩爆发生的可能性。以上思路处理岩爆问题总会有意或无意间将非平衡热力学

问题变为平衡热力学问题,将突然卸载问题变为缓慢加载问题,将由于能量释放导致破坏问题变成由于能量增加导致破坏问题,将多状态问题简化为单状态问题,这些都背离了仿真建模准则。作者主要对由弹性应变能产生的一类岩爆问题进行一些探讨性的研究,通过分析开挖前后两种不同应力状态下能量的关系,提出岩体的可储能准则。基于此准则可以分析岩爆过程中释放的能量的大小,并且可以合理解释开挖速度如何影响岩爆的产生。

2 关于能量的一些认识

如果从热力学角度看,岩爆过程中,岩体是一个耗散结构,属于非平衡热力学问题。所谓耗散结构是指在开放和远离平衡的条件下,在与外界环境交换物质和能量的过程中,通过能量耗散过程和内部的非线性动力学机制形成或维持的宏观时空有序结构。常用的有限元理论建立在平衡热力学基础之上,要解决岩爆问题,必须寻找新的突破口。如果从能量的角度解释岩爆问题,只需将重点放在以下两点:岩爆过程中要释放的总能量;释放能量的耗散方式也就是释放能量如何分配。可以忽略中间过程,直接从分析源头和结尾入手,其中最关心的是释放的总能量大小和最终块体动能这种耗散形式可以分配的数值大小。

2.1 能量的来源

对于应变型岩爆,其能量的最终来源是岩体原先存储的弹性应变能,但对于具体是哪部分岩体释

收稿日期:2008-08-08;修改稿收到日期:2008-11-23.

基金项目:国家自然科学基金重点(50539090)资助项目.

作者简介:秦剑峰*(1981-),男,博士生

(E-mail: qjianfeng@yahoo.com);

卓家寿(1938-),男,教授.

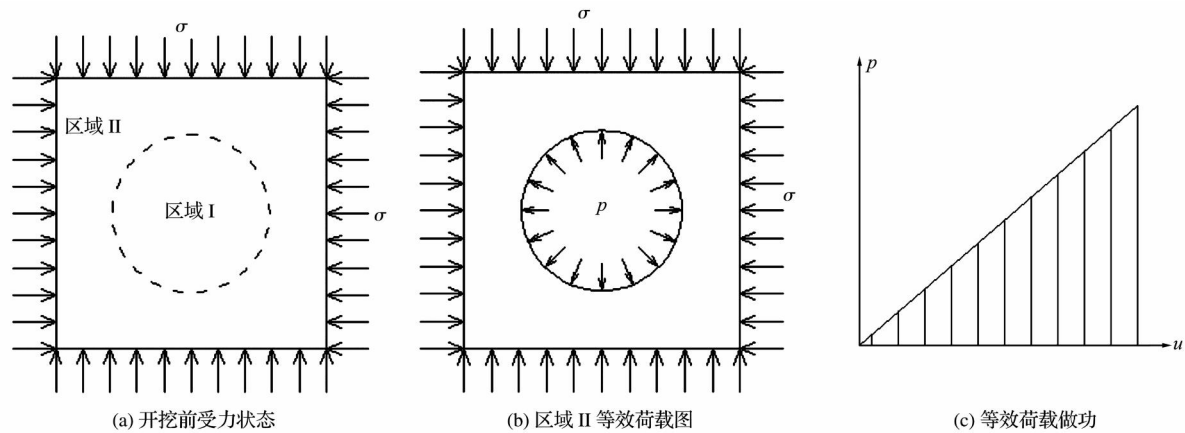


图 1 开挖速度对能量的影响

放的弹性能却有不同观点。开挖过程中如果产生岩爆,可以将原岩分为三个部分:被开挖岩体(岩体 I)、开挖后飞射出的岩体(岩体 II)、剩余岩体(岩体 III)。岩爆问题的研究对象是岩体 I 在机械外力作用下脱离原岩后岩体 II 和岩体 III 这两部分。如果仅仅将岩体 II 作为研究对象,其能量来源只是岩体 II 原先存储的可恢复弹性能,计算时会发现仅仅这部分能量不足以提供实际工程中块体飞射所需的动能和其他耗散能。岩体 II 在发生岩爆后应力会改变,能量也会改变,它对破坏岩体 II 的影响不可忽略。在岩爆过程中,只要在刚度方面围岩和破坏岩体满足一定的关系,则岩体 III 也会以相似的方式对岩体 II 贡献部分能量。所以在岩爆研究中必须要将岩体 II 和岩体 III 作为整体,才能对能量来源做出正确、合理的评估。

2.2 开挖速度和能量关系

在影响岩爆产生的诸多因素中,有一个是开挖速度,文献[1]也提及当开挖速度由 0.27 m/min 加快至 0.54 m/min 时,岩体会由平静状态突变为剧烈岩爆。从岩爆能量来源角度可以给出一些解释。考虑两种极限开挖方式:瞬间开挖和缓慢开挖。瞬间开挖时,相当于在开挖面突然施加和原来内力大小相等、方向相反的力,但持续时间为零,这个力不对岩体做任何功,岩体原先存储的弹性能来不及以任何方式转化,保持不变;而缓慢开挖,相当于逐步对开挖面施加和原内力相反的力,在这个过程中,岩体由于原先平衡被破坏,会沿着等效力方向发生应变,等效力对岩体做负功,使其存储的弹性能变小。实际工程介于上述两种极限假定之间。图 1(a) 为平面开挖示意图,区域 I 为将要开挖部

分,开挖前区域 II 可以等效为图 1(b) 所示。瞬间开挖相当于突然施加和图 1(b) 中等效荷载 p 大小相等、方向相反的荷载,由于作用时间很短,这个力不对区域 II 做功,区域 II 在这样的开挖方式下弹性能保持不变。如果缓慢开挖, p 将逐渐减小至零,这个过程相当于施加图 1(c) 所示荷载,荷载对区域 II 做功,使其存储的弹性能变小。

2.3 能量的耗散

岩爆过程中涉及多种能量的耗散形式:损伤、塑性变形、新的表面开裂和滑动、块体飞出、各种辐射等。岩体在高围压下表现为塑性,破坏过程中以塑性耗散为主;而在低围压下岩体表现为脆性,破坏过程中主要是克服表面能消耗能量。而岩爆的产生正是由于开挖使岩体围压降低,在开挖过程中岩体由塑性向脆性转化,从而最终产生张拉或张剪破坏。

3 岩体的可储能准则

3.1 微观解释

从微观上看,单元的应力状态(各主应力大小的比例)制约着单元可存储能量的大小。应变型岩爆多发生在岩体性质较好的地下开挖工程中。开挖前岩体初始应力都在屈服面以内,完全可以认为处于弹性状态,这样开挖面附近岩体内的可释放弹性能可以简单得到,这个能量称为实储能,记为 E_0 ;而开挖后可以先抛开屈服准则,假设岩体仍处于弹性状态,得到开挖面附近受开挖影响区域最小主应力 σ_3 (工程上称之为围压),再引入相应的屈服准则,固定大小的 σ_3 与屈服强度包络线相交会得到相应的 σ_1 ,这个应力状态的单元体所存储的能量就

是单元此时的可储能,记为 E_1 。当 $E_0 > E_1$ 时,多余的能量释放。岩爆正是由于开挖使自由面附近单元应力状态产生突变,可储能降低,无法存储开挖前应力状态下存储的弹性能,进而释放多余能量的过程。

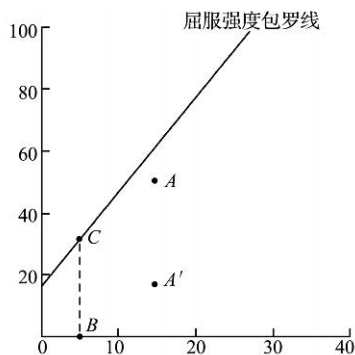


图2 卸载过程单元能量变化示意图

如图2所示,若开挖前单元体应力状态为A点,处于较高水平,开挖造成围压降低至B,在这个围压下,单元体最大可存储能量所对应的应力状态为C点,可以看出 $E_0^A > E_1^C$,此时多余能量会在瞬间释放;反之,若开挖前单元应力状态为A'点,开挖同样造成围压至B点对应值,而此时 $E_0^{A'} < E_1^C$,不会有多余能量释放。

从微观上单个单元可以解释可储能准则,但如果应用到工程上则存在一些问题。要考虑开挖后岩爆是否产生,不可能只考虑单个单元,必须将受开挖影响应力重分配的大部分单元考虑在内。对比开挖前后两个状态,有的单元可储能小于实储能,另外一些单元相反,最关键一点是当发生岩爆时,所考虑的单元并不要求都达到相应应力下最大储能状态,实际上这也是不可能的。

3.2 宏观解释

从宏观上看,对应于应力状态的是约束形式(位移边界和应力边界)。存在这样一个事实,对于不同的约束形式,岩体最终破坏时的能量不同,也就是它们在相应的约束下破坏前可存储的能量不同。相反地,如果给定位移和应力边界,在相应的屈服准则下,固定大小和形状的岩体可存储的最大能量是可以确定的。在岩体开挖过程中,原本在开挖方向的约束被解除,三向约束的岩体变成双向约束,岩体可储能大小发生变化,这是造成岩爆的最根本的外在因素。文献[5]形象地将这个过程类似于原子核周边电子由高能级轨道向低能级轨道跳

跃释放其能量变化,指出一旦破坏启动,真正需要消耗的能量即为岩体单向应力状态破坏所需能量。文献[6]给出岩石试件典型的应力-应变曲线,如图3所示。从图中可以看到,不同围压下,试件到达峰值应力前所存储的能量不同。

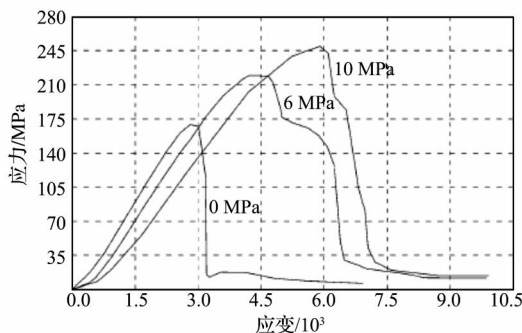


图3 完整新鲜花岗岩样三轴试验应力-应变曲线

3.3 计算方法

图1(a)所示以开挖区域为岩体I,剩余部分为岩体II。开挖前岩体处于弹性状态,岩体II内部存储的弹性能为 U_0 。瞬间开挖后岩体II表面的等效荷载 p 变为零,围压减小,在这样的约束形式下岩体II可以存储的能量需要确定。用近似的简单加载理论对岩体II进行模拟加载,选取合适的破坏准则,直到满足破坏准则为止。简单加载是通过将原有的应力边界同时乘以系数 λ 实现,算出破坏时岩体II消耗的能量,及岩体II在这个约束形式下的可储能 U_1 。当 $U_0 > U_1$ 时,即可能产生岩爆。如果产生岩爆,约束形式又会发生变化,以上步骤进行下一轮岩爆判断,直到 $U_0 \leq U_1$ 。

4 应用举例

4.1 一维简化模型

图4所示,块体长度为 a , c 和 b 为预计将要开挖的长度,块体厚度为 d ,弹簧受压初始变形为 e ,刚度为 k ,块体上下表面受大小为 σ 的压应力作用,接触面上摩擦系数为 μ 。设系统在开挖前处于平衡状态,而且假设有

$$f_{\max}(x) = \mu\sigma ad > ke = \mu\sigma(a-c)d \quad (1)$$

式中 $f(x)$ 为块体所能提供的摩擦力,相当于弹簧的围压,它随着块体和边界的接触长度而变化。

这个状态弹簧存储的弹性能 $U_0 = \frac{1}{2}ke^2$,随着在 x 方向开挖块体,块体所能提供的摩擦力会逐渐

降低,弹簧的围压减少,但弹簧存储的弹性能不会释放;当开挖长度超过 c 时,由摩擦力提供的围压将不足以使弹簧处于平衡状态。如果缓慢开挖,块体将会发生滑移,弹簧原先存储的弹性能缓慢释放,直到平衡;如果开挖速度过快,弹簧可储存的弹性能发生突变,远远小于其原先存储的弹性能,多余能量的突然释放将会使块体以一定的速度弹射出去。下面假定迅速开挖长度为 b ,此时块体可提供的最大摩擦力为

$$f = \mu \sigma (a - b) d \quad (2)$$

而且从式(1)中可以得到

$$k = \frac{\mu \sigma (a - c) d}{e} \quad (3)$$

如果弹簧要在这样的围压下平衡,那么其变形为

$$\Delta l = \frac{a - b}{a - c} e \quad (4)$$

弹簧存储的弹性能:

$$U_1 = \frac{1}{2} k \frac{(a - b)^2}{(a - c)^2} e^2 \quad (5)$$

这就是式(2)所示围压下弹簧的可储能。

开挖前后两个状态的能量差:

$$\Delta U = U_0 - U_1 = w + k \quad (6)$$

式中 w 为在破坏过程中块体克服摩擦力所消耗的能量, k 为块体的动能。

4.2 卸载岩爆分析

文献[7]对深部高应力条件下的花岗岩岩爆过程进行了实验研究,由于文中对试样细节没有完全交待,只能建立相似模型,利用可储能原则对卸载岩爆进行理论分析。下面模型中主要岩体参数及相应的破坏准则参数为文献[8]通过实验和回归分析得到。试件尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,容重为 27 kN/m^3 ,单向抗压强度为 126 MPa ,抗拉强度 5.4 MPa ,弹性模量 66.7 GPa ,泊松比

0.33。破坏准则为 Drucker-Prager 准则:

$$\alpha \cdot I_1 + \sqrt{J_2} = k \quad (7)$$

式中 I_1 为第一应力不变量, $I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$; J_2 为第二应力不变量,

$$J_2 = 1/6[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]$$

式中参数 $\alpha = 0.497$ 和 $k = 7.146$ 。

实验过程中先通过分级加载方式将三个方向主应力加载到 $\sigma_1 = 300 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 20 \text{ MPa}$, $\sigma_3 = 10 \text{ MPa}$,这个状态称为状态①;稳定 0.5 h 后瞬间卸载 σ_3 ,保持 σ_1 和 σ_2 不变,这个状态称为状态②。

对于状态①的应力状态可以得到 $\alpha \cdot I_1 + \sqrt{J_2} < k$ 。忽略加载过程中各种能量耗散,单位体积试件存储的弹性能:

$$u_0 = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] = 1266 \text{ KJ} \quad (8)$$

此时整个试件所存储的弹性能:

$$U_0 = u_0 \cdot V = 3.798 \text{ KJ} \quad (9)$$

对于状态②的应力状态可以得到 $\alpha \cdot I_1 + \sqrt{J_2} > k$,试件无法承受这样的荷载,通过近似的简单加载理论可以找出这个约束形式下试件刚好破坏的临界围压,即解方程:

$$\alpha \cdot (\lambda \sigma_1 + \lambda \sigma_2) + \frac{1}{\sqrt{6}} (\lambda \sigma_1 - \lambda \sigma_2)^2 + \lambda^2 \sigma_2^2 + \lambda^2 \sigma_1^2 = k \quad (10)$$

代入相应数据得到 $\lambda = 0.82$,在此形式的围压下单位体积可存储的弹性能:

$$u_1 = \frac{1}{2E} (\lambda^2 \sigma_1^2 + \lambda^2 \sigma_2^2 - 2\mu \lambda^2 \sigma_1 \sigma_2) = 436 \text{ KJ} \quad (11)$$

此时整个试件可存储的弹性能:

$$U_1 = u_1 \cdot V = 1.307 \text{ KJ} \quad (12)$$

由于卸载试件必须释放的弹性能:

$$\Delta U = U_0 - U_1 = 2.491 \text{ KJ} \quad (13)$$

这些能量除了用于克服表面能消耗部分外将主要以动能的形式释放。

作者用离散元软件 3DEC 对上述卸压岩爆过程进行模拟。首先将长方体六个面都固定,在其三个方向给定初始应力,达到平衡后,将其中一个侧面设定为自由面,可以看到图 5 岩体由开始的平静状态到剧烈破坏,块体飞射。

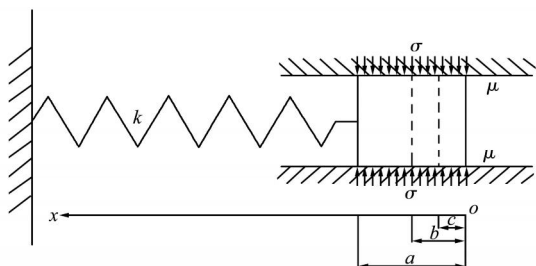


图4 简化的弹簧模型

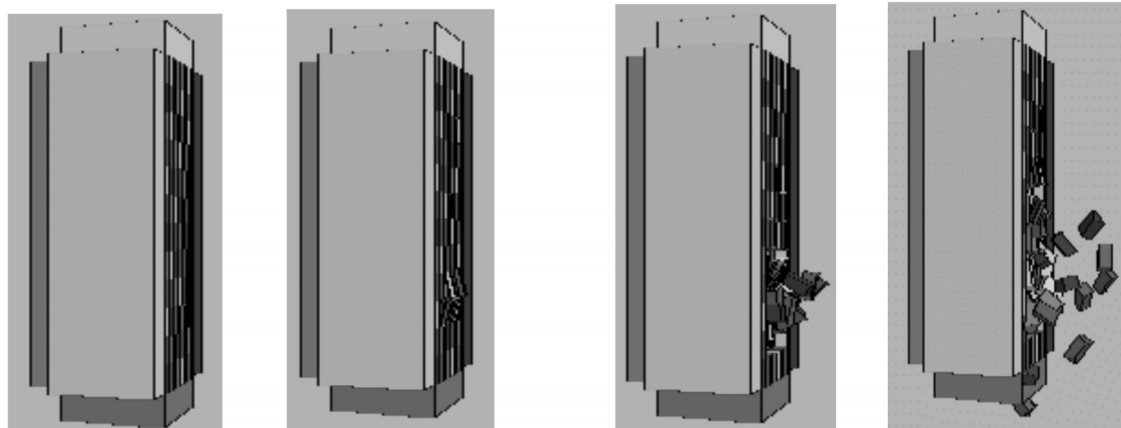


图 5 卸围压岩爆数值模拟

5 结 论

(1) 系统地论述了岩爆过程中所释放能量的来源、释放能量的去处和释放的原因三大问题。

(2) 岩体或单元可储能的能力并非材料属性一样的定值,而是随着外在因素而变化的。地下开挖过程中,开挖瞬间,产生自由面,围压减小,岩体可储能能力突然下降,原先储存能量如果超过岩体的可储能,多余能量释放,引起岩爆,以此为基础建立了可储能准则。

(3) 开挖速度影响岩体原储能的大小,从而改变原储能与可储能之间的差值,控制着岩爆的产生。

(4) 基于可储能原则,简单分析了一维和三维模型,并用商业软件再现了卸载岩爆这个现象。

参考文献(References):

- [1] LINKOV A M. Rockbursts and the Instability of Rock Masses[J]. *Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr*, 1996, **33**(7):727-732.
- [2] WANG J A, PARK H D. Comprehensive prediction of rockburst based on analysis of strain energy in rocks [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2001, **16**:49-57.
- [3] 王耀辉,陈莉雯,沈 峰. 岩爆破坏过程能量释放的数值模拟[J]. *岩土力学*, 2008, **29** (3): 790-794. (WANG Yao-hui, CHEN Li-wen, SHEN Feng. Numerical modeling of energy release in rockburst [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, **29** (3): 790-794. (in Chinese))
- [4] 祝启虎,卢文波,孙金山. 基于能量原理的岩爆机理及应力状态分析[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2007, **40**(2): 84-87. (ZHU Qi-hu, LU Wen-bo, SUN Jin-shan. Discussion on mechanism of rockburst and stress state based on energy principles [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2007, **40**(2): 84-87. (in Chinese))
- [5] 赵阳升,冯增朝,万志军. 岩体动力破坏的最小能量原理[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, **22** (11): 1781-1783. (ZHAO Yang-sheng, FENG Zeng-chao, WAN Zhi-jun. Least energy principle of dynamical failure of rock mass [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, **22** (11): 1781-1783. (in Chinese))
- [6] 杨小艳,王岳,黄达. 大型硬岩地下硐室围岩二次应力场特征弹脆塑性分析[J]. *水文地质工程地质*, 2007, **6**: 6-10. (YANG Xiao-yan, WANG Yue, HUANG Da. Analysis on secondary stress field characters of hard surrounding rock in large underground caverns by elasto-brittle-plastic constitutive model [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2007, **6**:6-10. (in Chinese))
- [7] 何满潮,苗金丽,李德建,王春光. 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): 865-876. (HE Man-chao, MIAO Jin-li, LI De-jian, WANG Chun-guang. Experimental study on rockburst processes of granite specimen at great depth [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, **26**(5): 865-876. (in Chinese))
- [8] 李建林,陈兴周. 岩体破坏准则及其参数研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2007, **3** (5): 982-986. (LI Jian-lin, CHEN Xing-zhou. Study on failure criterion and its parameter for rock mass [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2007, **3** (5): 982-986. (in Chinese))

Study on the energy storage ability criterion in a kind of rockburst and application

QIN Jian-feng^{*}, ZHUO Jia-shou

(School of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Study on a kind of rockburst-strain bursting from the point of energy. The researches give a complete discussion on the sources of energy ,the way energy dissipation ,the magnitude of the released energy and its reason. The energy storage ability criterion is put forward: the capacity of energy storage of rockmass is not a constant ,it changes with the stress. When the stress changes suddenly ,resulting the energy stored larger than the capacity of energy storage under present stress ,the residual energy will release in kinds of way ,including the kinetic energy. The simplified one-dimensional and three-dimensional models are analyzed based on the energy storage ability criterion ,and the process of rockburst in the condition of unloading is reappeared using the discrete element software 3DEC.

Key words : rockburst ; energy ; energy storage ability ; stress

(上接第 306 页)

An equivalent analysis of unidirectional viscoelastic jointed rock based on the adaptive algorithm in time-domain

REN Yi , YANG Hai-tian^{*}

(Department of Engineering Mechanics ,State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment ,
Dalian University of Technology ,Dalian 116023 ,China)

Abstract : A reasonable joint model is necessary for the numerical simulation of viscoelastic jointed rock , If considering joints and rock mass individually with their own constitutive model , the computational expense will be challenged when the number of joints is fairly large. This paper presents a numerical model to predict equivalent constitutive relationship and deformation of unidirectional viscoelastic joint rock. An adaptive precise algorithm in the time-domain and a simple equivalence assumption are combined to convert a time dependent inhomogeneous problem into a series of recursive time independent homogeneous problems which can be solved either by FEM or other well developed numerical schemes. An equivalent numerical simulation for an underground cave in unidirectional viscoelastic joint rock is given and compared with the solution provided by ANSYS In the viewpoint of balance between computing accuracy and efficiency , the results are fairly good.

Key words : Jointd Rock ;viscoelasticity ;equivalent analysis ; adaptive algorithm ;finite element