

# 动-静组合加载诱发岩爆时岩块弹射速度的计算

左宇军<sup>1, 2</sup>, 李夕兵<sup>1</sup>, 张义平<sup>1</sup>, 王卫华<sup>1</sup>

- (1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙, 410083;
2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳, 110004)

**摘要:** 以单轴动-静组合加载实验为依据, 能量平衡为原理, 损伤力学为手段分析动-静组合载荷作用下岩石发生破坏时能量的转换, 对岩爆能量组成以及单轴动静组合加载诱发的岩爆岩块弹射速度进行研究。研究表明, 与只考虑静载荷作用产生的岩爆相比, 按动-静组合载荷产生岩爆设计有岩爆倾向的深部地下工程岩体的支护更加符合实际。

**关键词:** 动-静组合加载; 岩爆; 弹射速度; 支护设计; 损伤

**中图分类号:** TU452      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1672-7207(2006)04-0815-05

## Calculation of ejection velocity of rock in rockburst caused by static-dynamic coupling loading

ZUO Yu-jun<sup>1, 2</sup>, LI Xi-bing<sup>1</sup>, ZHANG Yi-ping<sup>1</sup>, WANG Wei-hua<sup>1</sup>

- (1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** The energy transform and consumption and composition in rockburst were discussed on the basis of experiment on rock under static-dynamic coupling loading and according to energy conservation and damage mechanics, then the ejection velocity of rock in rockburst was determined and compared in consideration of damage based on uniaxial static-dynamic coupling loading experiment. According to analysis of examples, compared to rockburst caused only by static stress, it is more reasonable in practice to design the support system of deep underground engineering based on rockburst caused by static-dynamic coupling stress.

**Key words:** static-dynamic coupling loading; rockburst; ejection velocity; support design; damage

岩爆是采矿过程中发生的最严重的自然灾害之一。岩爆岩块弹射速度与岩体移动速度和岩体质点振动速度一样都是反映岩爆强度的重要指标, 在有岩爆危险巷道支护设计中, 该指标较其他指标如岩爆的震级更直接、更具体, 可直接用于巷道支护设计<sup>[1-4]</sup>, 所以, 确定岩爆岩块弹射速度具有实际意义。该参数主要是采用经验法或利用设备在现场进行观察测定<sup>[3]</sup>。ZUO Yu-jun 等<sup>[1]</sup>从岩爆的物理过

程及岩爆的表现形式出发, 探讨了岩块弹射速度的类型及其在有岩爆危险巷道支护设计中的意义, 并以岩石单轴静加载试验为基础, 对岩爆能量组成进行了探讨, 在考虑岩爆损伤能量消耗的前提下, 对岩爆岩块弹射速度进行了理论近似确定。

从岩爆原因来看<sup>[3]</sup>, 岩爆可大致分为两类: 一类是由于内部因素的作用, 使岩体内应力达到一定值, 满足一定范围的能量积聚时发生岩爆; 另一类

收稿日期: 2005-11-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10472134, 50490274, 50174056); 中国博士后科学基金资助项目(2005038250)

作者简介: 左宇军(1965-), 男, 湖南湘乡人, 高级工程师, 从事岩石动力学与数值试验研究

通讯作者: 左宇军, 男, 博士; 电话: 0731-8836628(0); E-mail: zuo\_yujun@163.com

是岩体内应力虽然不高,但由于外部因素的作用,如爆破扰动等,导致内、外应力叠加造成岩爆。常用的单轴静加载试验主要模拟第 1 类岩爆。从应力特点来看,第 2 类岩爆是动-静组合载荷造成的岩爆,可用岩石的动-静组合加载试验进行模拟。目前,模拟第 2 类岩爆的试验研究取得了一定进展,但主要是关于一维和二维动-静组合加载下岩石的破坏规律的研究<sup>[5-10]</sup>。

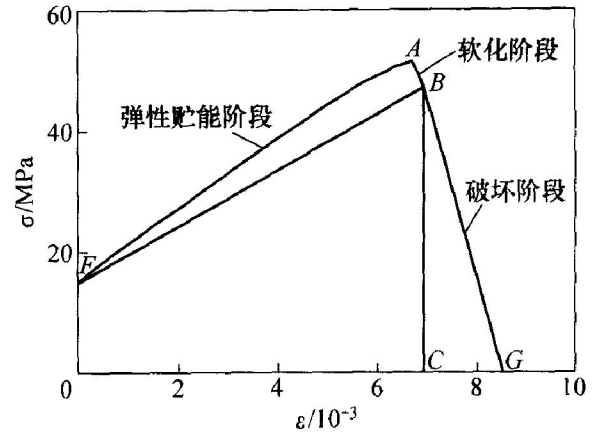
在此,本文作者主要以岩石单轴动-静组合加载试验为基础,对岩爆岩块弹射速度进行理论近似,并将其结果与文献[1]的分析结果进行比较。

## 1 动-静组合加载下岩石的破坏能量分析

### 1.1 能量组成

岩爆是岩石在瞬间将贮存在其内部的弹性性能释放出来的破坏过程。通常采用单轴压缩实验来模拟岩爆过程<sup>[11]</sup>,但在实际中,往往是受静载荷的岩体在爆破等动载荷扰动下诱发岩爆,所以,用动-静组合加载实验来模拟岩爆更加符合实际。一维动-静组合加载就是在一个方向加静载荷,然后在与静载荷同方向上加动载荷,使岩石在静载荷和动载荷共同作用下被破坏。从干燥的红砂岩单轴动-静组合加载下的应力-应变曲线(见图 1,从动载荷和静载荷共同作用的起始时间开始记录应变,此前所加预静载荷引起的变形未能记录)可知,受单轴静载的岩石在循环动载加、卸载试验中,FA 段、FB 段其卸载曲线仍为直线,基本能回到动-静载起始点 F,说明塑性变形可以忽略。可以认为 FA 段是线弹性阶段,损伤效应在应力达到峰值前并不明显,外界对试件所做的功(包括静载荷所做的功和动载荷所做的功)几乎全被岩石试件以弹性应变能的形式贮存起来,在接近应力峰值点 A 和超过该点后,岩石试件内部损伤迅速增长,宏观上导致应力软化下降(即 AB 段),在此阶段一部分贮存的弹性应变能逐渐转化为因损伤而大量消耗掉的损伤耗散能。根据 J. Lemaitre<sup>[12]</sup> 等效应变假设,可认为当等效应力  $\sigma_e$  达到岩石的动态断裂应力  $\sigma_c$  时,损伤度  $D$  达到临界值  $D_c$ ,材料发生宏观断裂,从而得到损伤断裂准则的表达式为  $\sigma_e = \sigma(1 - D_c) = \sigma_c$ 。在通常情况下,临界损伤值  $D_c = 0.2 \sim 0.5$ ;对于纯脆性损伤,  $D_c = 0$ ,

$\sigma_e = \sigma_c - \sigma_e^{[13]}$ 。所以,对于纯脆性岩石,可认为 B 点是从峰值点 A 开始的,即 AB 段的损伤耗散能可忽略不计。B 点为试件瞬间发生宏观破坏的开始点, G 点为试件破坏终止点。在该破坏过程中,应力大幅度下降,同时有碎片崩落、飞溅,并且发出很大的破裂响声,试件所贮存的大量弹性应变能迅速释放出来,其中一部分转化为在 BG 段持续损伤所消耗的损伤耗散能,剩余部分主要转化为岩石碎片的动能、声能和热能。



静载荷为 15 MPa, 动载频率为 2 Hz, 加载幅值为 200 kN

图 1 一维动-静组合加载下干燥红砂岩的应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain curve of dry red sandstone under uniaxial static-dynamic loading

由上述分析可知,外部对试件所做的功,几乎全部转化为弹性应变能,塑性应变能可以忽略。弹性应变能主要转化为 3 部分:一部分为损伤破碎能,用于介质的变形剪切断裂与破碎;一部分为动能,用于介质的崩落、飞溅;一部分为声能和热能,这一部分相对较少,可以忽略不计。能量组成可用下式表示:

$$U_e = U_1 + U_2 + U_3 \quad (1)$$

式中:  $U_e$  为单位体积弹性应变能;  $U_1$  为单位体积损伤所消耗的能量;  $U_2$  为单位体积介质断裂与破碎所消耗的能量;  $U_3$  为单位体积介质所获得的动能;  $U_1 + U_2$  统称为损伤破碎能(包括微观损伤与宏观断裂的耗散能)。

### 1.2 动-静组合加载下岩爆动能比例系数

根据上述分析,假设  $U_e$  在试件破坏阶段(BG)全部转化为损伤能  $U_1 + U_2$  和动能  $U_3$ ,其他能量可忽略不计。与单轴静加载引起的岩爆情况相同,动-

静组合加载引起的岩爆中岩块动能在总的弹性变形能中所占的比例系数为  $\eta$ , 其表达式为<sup>[1]</sup>:

$$\eta = U_3/U_e = U_3/(U_1 + U_2 + U_3) = 1 - \frac{\int_{D_B}^{D_C} YdD}{(1 - D_B)Y_B - (1 - D_C)Y_C} \quad (2)$$

式中:  $D_B$  和  $D_C$  分别为  $B$  点和  $G$  点对应的损伤值;  $Y_B$  和  $Y_C$  分别为  $B$  点和  $G$  点对应的损伤能量释放率。损伤参数  $D$  为<sup>[9]</sup>:

$$D = 1 - \left[ \left| \frac{\varepsilon}{\alpha} \right|^m + 1 \right] \exp \left[ - \left| \frac{\varepsilon}{\alpha} \right|^m \right], \quad \varepsilon \geq 0 \quad (3)$$

式中:  $m$  和  $\alpha$  均为概率分布参数。

为了方便分析, 应力-应变关系曲线可根据岩石在动-静组合加载下的应力-应变曲线将峰值应力后的曲线部分简化为直线。

从式(2)可见, 岩爆动能比例系数  $\eta$  是一个综合性指数, 它与材料损伤特性及累积过程、应力状态和本构特性都有直接联系。

岩爆损伤能量指数  $W$  是指在试件破坏阶段 ( $BG$ ) 弹性应变能的释放量与该过程中损伤耗散能之比<sup>[11]</sup>, 即

$$W = \frac{(1 - D_B)Y_B - (1 - D_C)Y_C}{\int_{D_B}^{D_C} YdD} \quad (4)$$

根据式(2)和(4), 岩爆动能比例系数  $\eta$  与岩爆损伤能量指数  $W$  的关系可表示为:

$$\eta = 1 - 1/W_D \quad (5)$$

这样也可以根据岩爆损伤能量指数  $W_D$  近似确定岩爆动能比例系数  $\eta$ 。

考虑到单轴动-静组合加载下岩石试件发生破坏与实际岩石中发生岩爆有一定程度的相似性,  $\eta$  可通过单轴动-静组合加载下岩石的应力-应变曲线求得。文献[1]只考虑了静载的作用, 通过白云岩等3种岩石单轴压缩试验应力-应变曲线求得岩爆损伤能量指数  $W$ , 据此计算的岩爆动能比例系数  $\eta$ , 如表1所示<sup>[1]</sup>。

表1 一维静载作用下的岩爆动能比例系数  $\eta$

Table 1 Rockburst kinetic energy proportional coefficient  $\eta$  under uniaxial static loading

岩石	抗压强度/ GPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	岩石损伤特性参数			$W$	$\eta$
				$\varepsilon_c$	$n$	$Y_c/\text{MPa}$		
白云岩	88.7	3.7	56	$4.8 \times 10^{-3}$	12	0.18	1.15	0.13
正长岩	220.0	7.1	59	$6.2 \times 10^{-3}$	32	0.56	1.32	0.24
花岗岩	176.0	7.3	62	$5.5 \times 10^{-3}$	25	0.32	1.27	0.21

注:  $n$  为表征材料脆性的特性参数;  $\varepsilon_c$  为材料常数。

现采用一维动-静组合载荷作用下红砂岩的破坏试验结果<sup>[7]</sup>, 计算红砂岩在不同静应力作用下的动能比例系数  $\eta$ 。首先建立动-静组合加载下岩石的本构模型。本构模型主要基于如下基本观点<sup>[9, 14]</sup>:

a. 岩石单元同时具有统计损伤特性和黏性液体的特性, 因而可以把岩石单元看成损伤体和粘缸的组合物, 即由损伤体1与粘缸并联再与损伤体2串联, 如图2所示。

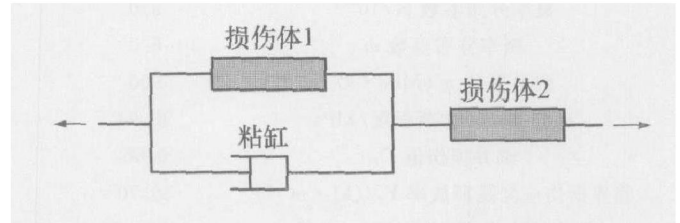


图2 岩石单元组合物模型

Fig. 2 Combination model of rock

b. 损伤体具有各向同性损伤特性, 在损伤之前是线弹性的, 平均弹性模量为  $E$ , 强度服从参数为 ( $m, \alpha$ ) 的概率分布。在一维加载时, 损伤参数  $D$  按照岩石的受力状态表示为:

$$D = 1 - \left[ \left| \frac{\varepsilon}{\alpha} \right|^m + 1 \right] \exp \left[ - \left| \frac{\varepsilon}{\alpha} \right|^m \right], \quad \varepsilon \geq 0 \quad (6)$$

式中,  $\varepsilon$  为损伤体的应变。

损伤体的本构关系  $\sigma - \varepsilon$  可表示为

$$\sigma_a = E\varepsilon(1 - D), \quad \varepsilon \geq 0 \quad (7)$$

式中,  $\sigma_a$  为损伤体的应力。

c. 粘缸没有损伤特性, 遵循的本构关系为

$$\sigma_a = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad (8)$$

式中:  $\varepsilon$  为粘缸的应变;  $\sigma_a$  为粘缸的应力。

d. 单元体在损伤之前是粘弹性体。将试验参数、本构模型拟合参数、临界损伤值  $D_c$ <sup>[10]</sup> 以及按上述原理计算得到的参数列于表2。从表2可以看出, 红砂岩的岩爆损伤能量指数  $W$  和岩爆动能比例系数  $\eta$  均随着静应力的增加而增加; 当静应力为0时,

表 2 一维动-静组合加载破岩试验与动能比例系数  $\eta$  计算结果

Table 2 Rockburst kinetic energy proportional coefficient  $\eta$  under uniaxial static-dynamic coupling loading

试验及拟合参数	一维静载应力/MPa				
	0	2	4	6	12
平均应变速率/ $s^{-1}$	$2.86 \times 10^{-2}$	$3.50 \times 10^{-2}$	$3.08 \times 10^{-2}$	$2.77 \times 10^{-2}$	$6.31 \times 10^{-2}$
平均应力加载速率 $\dot{\sigma}$ ( $MPa \cdot s^{-1}$ )	187.08	179.43	194.38	216.29	403.18
弹性模量 $E_1$ /GPa	3.40	3.40	3.40	3.40	3.34
弹性模量 $E_2$ /GPa	7.25	5.26	5.23	4.7	4.64
概率分布参数 $\alpha_1/10^{-3}$	5.0	4.2	4.0	3.5	9.5
概率分布参数 $m$	6.0	4.5	5.0	4.5	5.0
黏性系数 $\eta$ ( $MPa \cdot s$ )	900	200	200	100	10
动静载组合加载强度/MPa	26.94	19.02	17.30	15.14	41.53
临界损伤值 $D_c$	0.06	0.30	0.24	0.42	0.75
临界损伤应变能释放率 $Y_c/(kJ \cdot m^{-3})$	56.70	70.24	49.60	72.50	2973.70
简化的峰值应力后的 $\sigma$ - $\epsilon$ 关系	$\alpha = 94.3 - 13.5\epsilon$	$\alpha = 63.4 - 10.6\epsilon$	$\alpha = 86.5 - 17.3\epsilon$	$\alpha = 121 - 30.3\epsilon$	$\alpha = 831 - 83.1\epsilon$
岩爆损伤能量指数 $W$	0.37	1.84	7.50	55.77	1 062.00
岩爆动能比例系数 $\eta$	-1.70	0.46	0.87	0.98	0.99

注：假设图 1 中 A 点为破坏开始点，破坏终止点 G 的损伤值  $D = 1$ 。

红砂岩的岩爆动能比例系数  $\eta$  为负，说明此时的弹性应变能还不足以损伤和破碎岩石，更没有弹性应变能转化为动能，岩爆不会发生。

比较表 1 和表 2 可知，动-静组合应力大大地提高了岩爆损伤能量指数  $W$  和岩爆动能比例系数  $\eta$ ，说明受地应力作用的深部开采岩体，岩爆的可能性和岩爆的危害程度加大。此外，岩爆损伤能量指数  $W$  越大，岩爆时岩块动能所占弹性变形能的比例系数  $\eta$  也越大，发生岩爆的可能性也越大，所以，岩爆动能比例系数  $\eta$  同样是评价岩石岩爆倾向性的一个重要指标。

采用上述方法可很好地模拟矿柱发生岩爆时岩体的应力状态，所以，其结果能较好地符合矿柱发生岩爆的情况。由于地下洞室围岩发生岩爆的一般应力状态为径向应力为零的双轴应力状态和径向应力为最小应力的三轴应力状态<sup>[15]</sup>，所以，用上述方法近似模拟多维应力状态岩体发生岩爆的情况，与实际情况有差异。多维应力状态岩体发生岩爆时动能比例系数的确定有待进一步研究。

## 2 岩爆岩块弹射平均速度的实例计算与分析

采用文献[1]的计算方法对动-静组合加载下产生的岩爆的岩块弹射平均速度进行确定。

某地下工程有一由红砂岩组成的矿柱，密度为  $2.11 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，弹性模量  $E_1$  为 3.34 GPa，受到

的竖向静应力为 12 MPa，受一动力扰动，动-静组合弹性模量  $E_2 = 4.64 \text{ GPa}$ ，受到 12 MPa 水平静载应力的红砂岩全应变能为  $197.6 \text{ kJ/m}^3$ ，按照本文计算方法可得动能比例系数为 0.99，发生岩爆时的平均岩块弹射速度为  $13.6 \text{ m/s}$ 。这样的弹射速度足以毁坏常规的加强支护系统，要求在支护系统的设计时要特别注意。而文献[1]按只考虑静载荷作用产生的岩爆计算岩爆岩块弹射平均速度为  $v_p = 1.10 \sim 1.26 \text{ m/s}$ ，这时支护系统可能是安全的，但这样设计支护系统可能留下安全隐患。

根据前面的实例分析，与只考虑静载荷的作用产生的岩爆相比，按动-静组合载荷产生岩爆设计有岩爆倾向的深部地下工程岩体的支护，更有现实意义。另外，按静载荷作用产生的岩爆机理和按动-静组合载荷作用产生的岩爆机理计算的岩爆岩块弹射速度还有待进一步验证。

## 3 结 论

a. 考虑到单轴动-静组合加载下岩石试件发生破坏与实际岩石中发生岩爆具有相似性，以单轴动-静组合加载实验中岩石的破坏为依据，分析动-静组合加载下岩石破坏的能量转换问题。

b. 在考虑岩爆损伤能量消耗的前提下，求出岩爆时应变能转换为动能的比例系数，同时对岩爆岩块弹射速度进行近似确定，其计算方法可供深部有岩爆危险的巷道支护设计时参考。

c. 与只考虑静载荷作用产生岩爆相比,按动静组合载荷产生岩爆设计有岩爆倾向的深部地下工程岩体的支护更有现实意义。

### 参考文献:

- [1] ZUO Yurjun, LI Xirbing, ZHOU Zirong. Determination of ejection velocity of rock fragments during rock burst in consideration of damage [J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(5): 618 - 622.
- [2] 李庶林. 岩爆倾向性的动态破坏实验研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2001, 20(4): 436 - 438.  
LI Shu-lin. The experiment on rock burst tendency dynamic failure [J]. Journal of Liaoning Engineering and Technology University, 2001, 20(4): 436 - 438.
- [3] 郭然, 于润沧. 有岩爆危险巷道的支护设计[J]. 中国矿业, 2002, 11(3): 23 - 26.  
GUO Ran, YU Run-cang. The support design for rock burst tendency tunnels [J]. Chinese Mining Engineering, 2002, 11(3): 23 - 26.
- [4] 耶戈罗夫 H B. 岩爆显现的某些特点及其预防措施[J]. 国外金属矿山, 1990(5): 23 - 27.  
Yiagerov H B. The characteristics of rock burst and the prevention measures [J]. The Foreign Metal Mines, 1990(5): 23 - 27.
- [5] Li X, Ma C. Experimental study of dynamic response and failure behavior of rock under coupled static-dynamic loading [C]// Ohnishio A. Proceedings of the ISRM International Symposium 3rd ARMS. Rotterdam: Mill Press, 2004: 891 - 895.
- [6] 马春德. 一维动静组合加载下岩石力学特性的试验研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2004.  
MA Chun-de. Experimental study on mechanics properties of rock under uniaxial coupled static-dynamic loading [D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2004.
- [7] 马春德, 李夕兵, 陈枫, 等. 单轴动静组合加载对岩石力学特性影响的试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2004, 24(4): 1 - 4.  
MA Chun-de, LI Xirbing, CHEN Feng, et al. Test and study of mechanical properties of rock under uniaxial static-dynamical combination load [J]. Mining Research and Development, 2004, 24(4): 1 - 4.
- [8] 左宇军, 李夕兵, 马春德, 等. 动静组合载荷作用下岩石失稳破坏的突变理论模型与实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(5): 741 - 746.  
ZUO Yurjun, LI Xirbing, MA Chun-de, et al. Catastrophic model and testing study on failure of static loading rock system under dynamic loading [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(5): 741 - 746.
- [9] 左宇军. 动静组合加载下的岩石破坏规律研究[D]. 长沙: 中南大学资源与安全工程学院, 2005.  
ZUO Yurjun. Study on failure and fragmentation characteristics of rock under static-dynamic coupling loading [D]. Changsha: School of Resources and Safety Engineering, Central South University, 2005.
- [10] ZUO Yurjun, LI Xirbing, ZHOU Zirong, et al. Damage and failure rule of rock undergoing uniaxial compressive load and dynamic load [J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(6): 742 - 748.
- [11] 刘小明, 李焯芬. 脆性岩石损伤力学分析与岩爆损伤能量指数[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(2): 140 - 147.  
LIU Xiao-ming, LI Zhuo-fen. The damage mechanics analysis and rock burst damage index for brittle rock [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(2): 140 - 147.
- [12] Lemaitre J. An equivalent strain hypothesis [J]. Journal Engineering Materials and Technology, 1985, 107(1): 83 - 89.
- [13] 杨小林, 王树仁. 岩石爆破损伤断裂的微观机理[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 247 - 252.  
YANG Xiao-lin, WANG Shu-ren. Meso-mechanism of damage and fracture on rock blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(3): 247 - 252.
- [14] 李夕兵, 左宇军, 马春德. 动静组合加载下岩石破坏的应变能密度准则及突变理论分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2814 - 2824.  
LI Xirbing, ZUO Yurjun, MA Chun-de. Failure criterion of strain energy density and catastrophe theory analysis of rock subjected to static-dynamic coupling loadings [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2814 - 2824.
- [15] 许东俊, 章光, 李廷芥, 等. 岩爆应力状态研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(2): 169 - 172.  
XU Dong-jun, ZHANG Guang, LI Ting-jie, et al. The research of the stress state in rock burst [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(2): 169 - 172.