

文章编号: 1004 - 0609(2003) 03 - 0754 - 06

矿柱岩爆过程声发射的数值模拟^①

王善勇, 唐春安, 徐 涛, 谭志宏

(东北大学 岩石破裂与失稳研究中心, 沈阳 110004)

摘 要: 由损伤力学理论与微元强度统计理论, 得到了岩石声发射参数与损伤参量的关系。应用自行开发的 RF-PA^{2D} 程序对矿柱岩爆的物理过程进行了数值模拟, 其结果再现了矿柱岩石微破裂诱致宏观破裂的演化过程以及和微破裂相关的声发射事件源的空间分布特征和事件序列特征。特别是考虑到材料非均匀性的影响, 分析了不同粒度材料的模型产生不同岩爆模式的原因。同时研究了岩爆发生过程“平静期”和“损伤愈合”的特性以及在大的岩爆前有较小的声发射这种前兆出现的规律。

关键词: 数值模拟; 岩爆; 损伤; 声发射

中图分类号: TD 315

文献标识码: A

损伤统指存在于材料内部的各种缺陷。损伤力学就是利用宏观变量来研究微观变化对材料性质的影响。岩石是一种复杂的自然地质体, 在各种外界载荷和外界环境的作用下, 内部含有各种各样的缺陷。在力的作用下这些缺陷将发生成核、扩展、贯通、甚至闭合。声发射是材料变形时, 局部微破裂产生的一种应力波, 它必然与材料内部的缺陷及这些缺陷的繁衍过程有关。

矿柱发生岩爆的过程, 本质上是矿柱岩石内缺陷损伤演化到发生大规模突然破坏的过程, 同时有大量的声发射产生, 因而利用损伤力学的观点和声发射技术分析矿柱岩爆的孕育过程, 将有助于人们对岩爆机理的认识。

近年来, 随着计算机飞速发展, 数值模拟作为研究岩石材料破坏过程的有效手段日益受到人们的重视^[1-4]。本文作者利用自行开发的、专门模拟岩石损伤破坏的数值模拟软件 RFPA^{2D} (rock failure process analysis) 程序^[5-10], 对矿柱岩爆进行了数值模拟, 再现了矿柱发生岩爆的整个物理过程。

1 岩石声发射参数与损伤参量的关系

岩石在受载情况下发生变形, 由于内部不断发生微破裂而发射弹性波。所谓声发射, 就是这种伴随损伤过程而产生的弹性波的发射。岩石的声发

射, 反映岩石损伤的程度, 它与岩石内部缺陷的演化直接相关。从本质上看, 由于声发射规律是一种统计规律, 因此它又必然与材料内部的统计分布规律一致。

Lemaitre 建立的单轴应力状态下材料的损伤模型为

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D) \quad (1)$$

式中 σ —单轴应力; E —弹性模量; ε —弹性应变; D —损伤参量, 表示材料体积单元中存在的微缺陷的比率。损伤参量的表达式为

$$D = S/S_m \quad (2)$$

式中 S —单轴应力状态下一个横截内微缺陷所占的面积; S_m —横截面面积。Krajcinovic 认为微元的强度分布服从 Weibull 分布, 其分布密度函数为

$$\varphi(\varepsilon) = \frac{Bm}{\varepsilon_0} \left[\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right]^{m-1} \exp \left[-B \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \right] \quad (3)$$

式中 B —与尺寸及材料变形特征有关的参数; m —均质度, 反映微元强度分布集中程度的参数; ε_0 —由实验确定的常数。

当应变从零增至 ε 时, 损伤的截面积为

$$\begin{aligned} S &= S_m \int_0^\varepsilon \varphi(x) dx \\ &= S_m \left\{ 1 - \exp \left[-B \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \right] \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

岩石材料一般有初始损伤, 设应变为 $\varepsilon = \varepsilon_0$ 时, 初始损伤的截面积为 S_0 。仿上推导, 则有

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49974009); 国家自然科学基金重点资助项目 (50174013)

收稿日期: 2002-05-17; 修订日期: 2002-08-07

作者简介: 王善勇 (1974-), 男, 博士研究生。

通讯联系人: 唐春安, 教授; 电话: 024-83677705; E-mail: tca@mail.neu.edu.cn

$$S_0 = S_m [1 - \exp(-B)] \quad (5)$$

从微观上考虑, 微元只有两种状态, 即不破坏和破坏。微元松弛将会导致局部应力释放, 产生声发射。因此每个微元的破坏都可看作一个声发射源, 声发射的数量应与新损伤的截面积成正比。有多少声发射源就应该有多少声发射事件, 即声发射事件数可表达为

$$N = A_1 (S - S_0) = A \left[\exp(-B) - \exp \left[-B \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m \right] \right] \quad (6)$$

式中 A_1 —比例系数; $A = A_1 S_m$ 。

将式(2)代入式(6), 得到

$$N = A (D - D_0) \quad (7)$$

式中 D_0 —损伤参量的初始损伤值。

式(7)反映了声发射事件数与损伤参量具有一致性。

2 数值模拟

2.1 数值模型简介

RFPA^{2D}是基于有限元应力分析原理以及弹性损伤理论开发的岩石材料破坏过程数值模拟软件, 它由应力应变分析和破坏分析两部分组成。应力应变分析的原理和普通的有限元方法一样, 破坏分析是根据破坏准则判断单元破坏与否, 破坏的单元采用强度和刚度弱化处理, 调整模型的刚度矩阵, 然后再进行应力分析, 直至材料完全破坏。如果有单元破裂, 则根据岩石的声发射与岩石的损伤具有一致性的假设^[11], 认为声发射的比率与岩石破坏的单元面积成正比, 计算出每个声发射事件的能量

$$\Delta E_i = E_{ic} - E_{ir} \quad (8)$$

式中 E_{ic} —单元破坏前的应变能, E_{ir} —单元破坏以后的应变能。

$$E_{ic} = \frac{1}{2E} (\sigma_{i1}^2 + \sigma_{i3}^2 - 2\mu\sigma_{i1}\sigma_{i3}) \cdot A_i t \quad (9)$$

$$E_{ir} = \frac{1}{2E} (\sigma'_{i1}^2 + \sigma'_{i3}^2 - 2\mu\sigma'_{i1}\sigma'_{i3}) \cdot A'_i t \quad (10)$$

式中 σ_{i1} , σ_{i3} —单元破坏前的主应力; σ'_{i1} , σ'_{i3} —单元破坏后达到平衡状态时的主应力; A_i , A'_i —破坏前后单元的面积; t —单元的厚度; E —抗压弹性模量; μ —泊松比系数。

采用具有上下顶底板的平面应变矿柱模型, 仅考虑顶底板的岩石性质与矿柱相同的情形。假设随着开采的进行, 通过顶底板传递给矿柱的压力不断增加。两矿柱为倾斜状态, 与地面夹角为 20° (图

1), 其尺寸为宽 2 m, 高 2 m, 顶底板和矿柱一起划分为 $200 \times 200 = 40\,000$ 个单元。模拟过程采用位移加载的方式, 共计加载 100 步, 每步加载 0.1 mm。

为了研究材料非均匀性的影响, 假定岩石的力学性质(单元的弹性和强度性质)服从 Weibull 统计分布 $\varphi_e(m, \mu)$, m 越大, 表明岩石的性质越均匀。本模型中, 弹模和抗压强度的分布参数分别为 $\varphi_e = 560$ GPa 和 $\varphi_0 = 5.2$ GPa。

采用修正的莫尔-库仑准则判据作为单元破坏的准则。其中摩擦角取为 30° , 拉压比为 1/10。具体模型和参数分布见图 1 所示。图中的灰度代表单元弹模值的大小。灰度越高, 值越大。

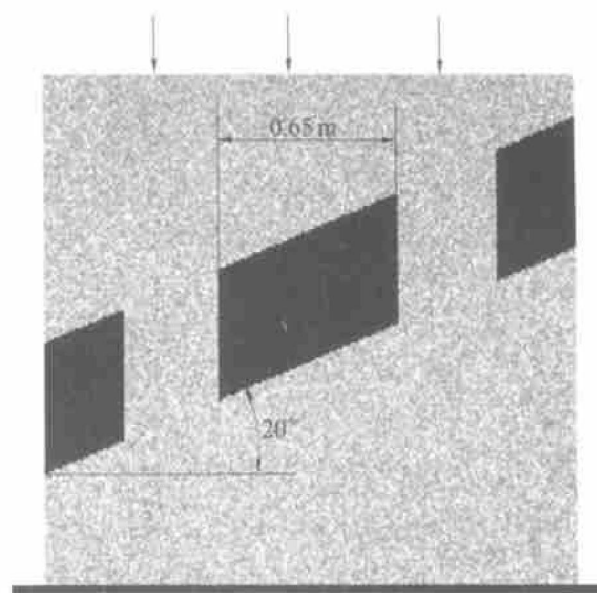


图 1 模型受力简图

Fig. 1 Schematic diagram of loading conditions established with RFPA^{2D}

2.2 数值模拟结果与讨论

由于岩石的自然损伤, 在压应力作用下, 矿柱内形成局部损伤拉应力集中, 如图 2 Step 18 所示。这些局部损伤拉应力引起矿柱内局部微破裂, 并伴随着少量声发射产生, 如图 3 Step 18 所示。图中圆圈大小代表声发射释放的能量大小, 圆圈的多少代表声发射的数量, 黑圆圈代表拉破坏, 白圈表示剪切破坏, 黑色区域反映的是以前积累的声发射。随着压应力的逐渐增加, 局部微破裂也相应增加, 并且在矿柱的某些区域形成微破裂聚集, 形成严重损伤区。该地区的微裂纹密度和声发射能量和频度明显大于其它地区, 如图 2 Step 32 和 Step 54 所示。图 3 Step 32 和 Step 54 所示再现了矿柱破坏过程中声发射能量和频度的明显集中, 即声发射事件源的局部化。如果在实际矿山开采过程中, 由于矿柱中

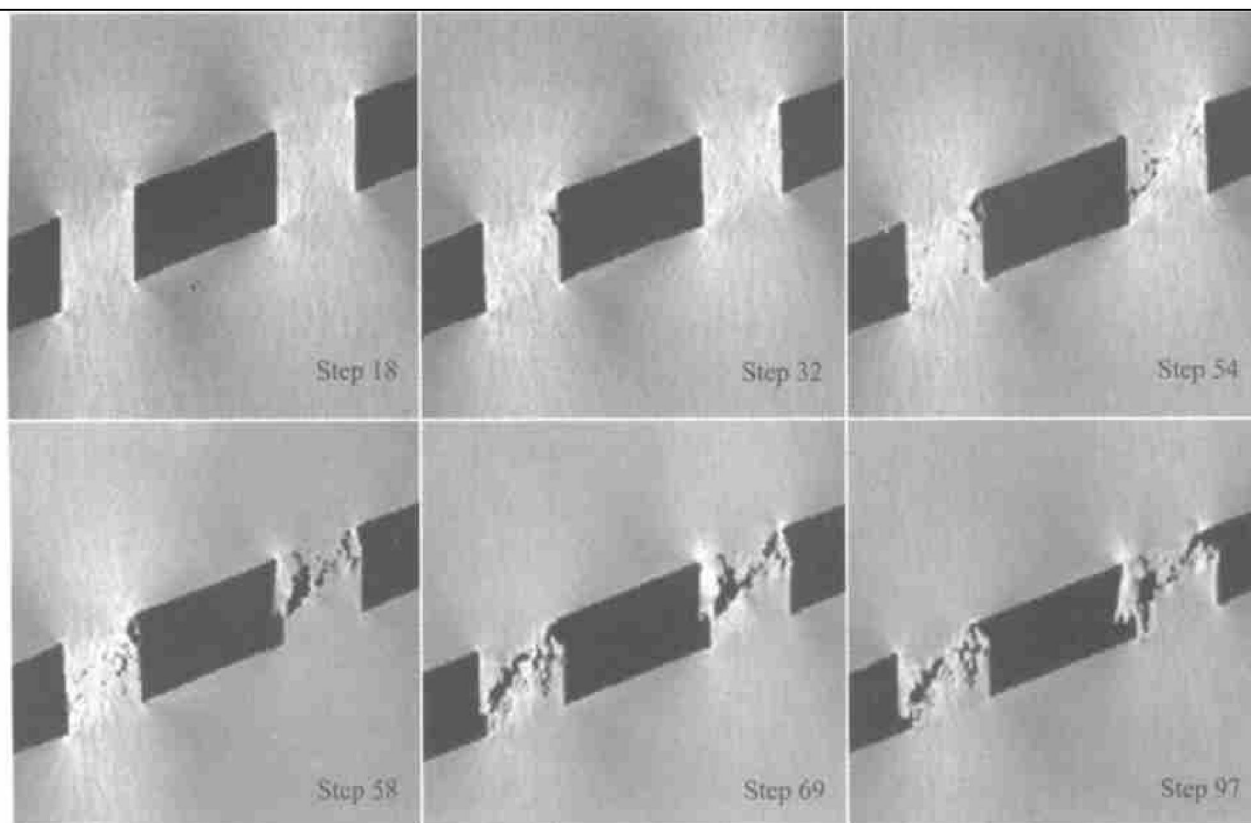


图 2 RFPA^{2D}数值模拟矿柱破坏剪应力图($m = 2.5$)

Fig. 2 Pillar failure mode with hanging wall shear by using RFPA^{2D}($m = 2.5$)

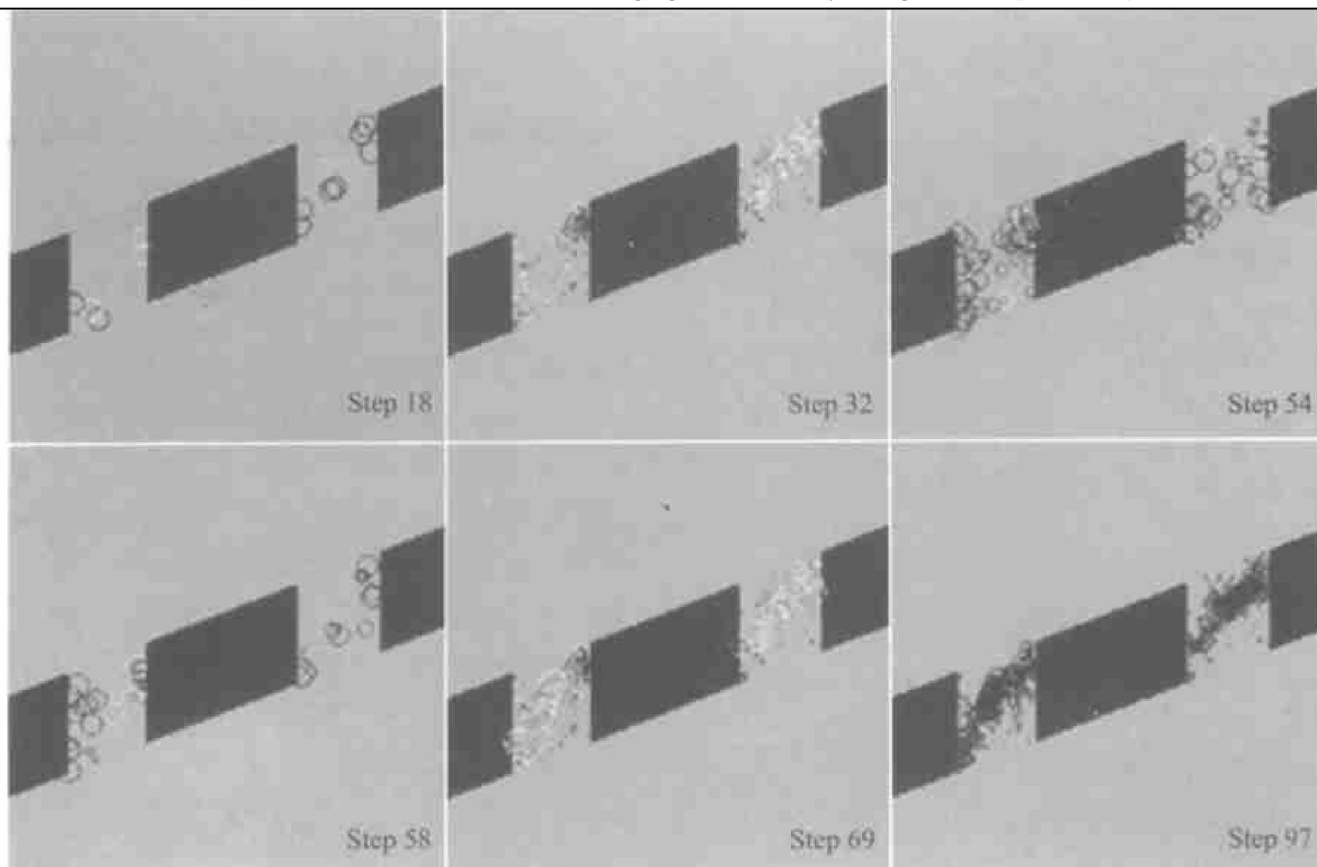


图 3 RFPA^{2D}数值模拟矿柱破坏声发射图($m = 2.5$)

Fig. 3 Acoustic emission source location during pillar failure with hanging wall shear by using RFPA^{2D}($m = 2.5$)

一些地质构造弱面(如节理、断层)的存在,使进一步开采所诱发的应力是拉应力,则严重损伤区将成为岩爆的震心,并会产生一个大的破坏(岩爆)。如图 2 中,首先是 Step 58 右边矿柱发生岩爆,然后随着压应力的进一步增大,到 Step 69 左边矿柱随之发生岩爆。由图 3 Step 58 和 Step 69 明显可以看到岩爆发生时声发射最为激烈。从图 4 中矿柱岩爆的全程应力—应变和声发射曲线可以看出,伴随着两次大的岩爆的发生,产生了两次大的应力降,如应力—应变曲线的 *BC* 段和 *CD* 段所示。同时我们注意到在两次大的岩爆过程中有一个“平静期”(quiet period),这是由于在第一次大的岩爆(右边矿柱破坏)之后,有大量的能量释放,虽然左边矿柱仍然处于较高应力状态,但不足以立即发生岩爆,随着压应力的进一步增大,微震集聚区将经历一个“损伤愈合”^[12]过程,一部分应变能将被吸收,预示着下一次岩爆的到来。在“损伤愈合”过程,持续作用的高压应力再一次在严重损伤区形成局部拉应力场,聚集的弹性能突然释放,形成左边矿柱的岩爆。如果把两次大的岩爆看成两次主震,两次岩爆之间的过程对应于微地震的“平静期”,那么图 4 所示的 *AB* 段对应的声发射就可以看成是主震的前震,对这一时期声发射的研究应对于预测采矿工程中矿柱岩爆的发生很有意义,因此时的声发射可以看成是岩爆发生的前兆。从图 2 和图 3 Step 97 所示可以看出矿柱发生两次大的岩爆以后,由于大量的弹性能的释放,应力变化趋于稳定,但仍有少量声发射产生,如图 4 *DEF* 段,这一阶段可以看成是主震后的余震阶段。从应力—应变曲线可以看出,这一阶段矿柱虽已发生了破坏,但仍具有一定的承载能力,即残余强度。

尤其值得注意的是从图 4 我们发现大量声发射

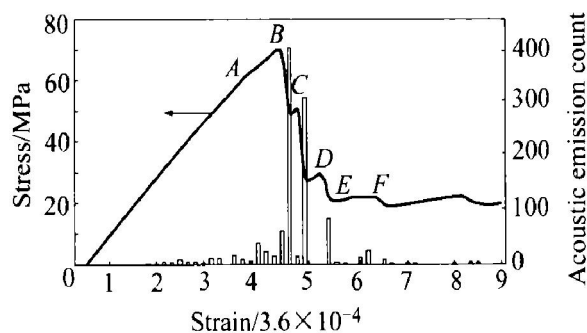


图 4 RFPA^{2D}数值模拟得到的矿柱岩爆应力—应变曲线和声发射谱

Fig. 4 Stress—strain and acoustic emission curves of pillar rock burst obtained from RFPA^{2D}

的突然发生(岩爆的发生)并没有出现在矿柱岩石应力—应变曲线的峰值点,而是出现在峰值点之后。这可以这样解释:由于非均匀性的影响,在岩体内,部分形成高应力区或低强度区,其抵抗变形的能力随变形增加而降低,呈现应变软化现象,而另一部分岩体应力又未超过峰值强度,其抵抗变形能力则仍随变形增加而增加,当发生应变软化的部分处于非稳定平衡状态,在受到外界微小扰动时,则将破坏原来的平衡状态而失稳(岩爆),而此时已处于应力峰值后的变形阶段。

图 5 给出了不同均质度 m 分别为 1.5, 2, 3, 5 的矿柱发生岩爆的应力—应变曲线,从图中可以发现,随着均质度的逐渐增加,矿柱的脆性逐渐增强,发生岩爆的应力降也逐渐增大。图 6 给出不同均质度矿柱发生岩爆的声发射图,从图中可以看出随着岩石均匀程度的增强,声发射的突然释放显著,并且前兆声发射不明显,从而岩爆的的隐蔽性和危险性增强。

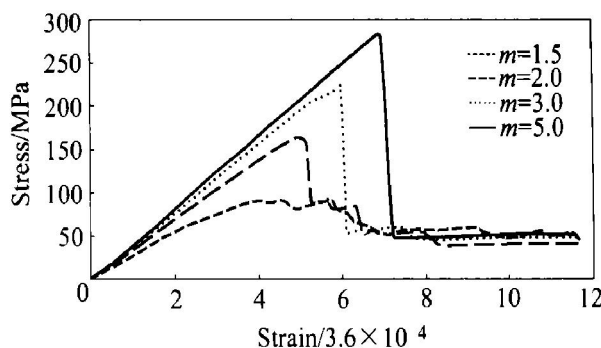


图 5 不同均质度矿柱岩爆的应力—应变曲线

Fig. 5 Influence of pillar material heterogeneity on stress—strain curves for four specimens with different homogeneity indices (simulated with RFPA^{2D})

3 结论

1) RFPA^{2D}程序再现了矿柱岩爆的整个过程。数值模拟结果演示了矿柱岩石微破裂诱致宏观破裂的演化过程以及和微破裂相关的声发射事件源的空间分布特征和事件序列特征。

2) 岩石的声发射强度与损伤参量具有一致性。

3) 岩爆发生过程具有“平静期”和“损伤愈合”的特性以及在大的岩爆前有较小的声发射这种前兆出现。

4) 声发射事件的局部化是岩爆发生的一个重要特征。

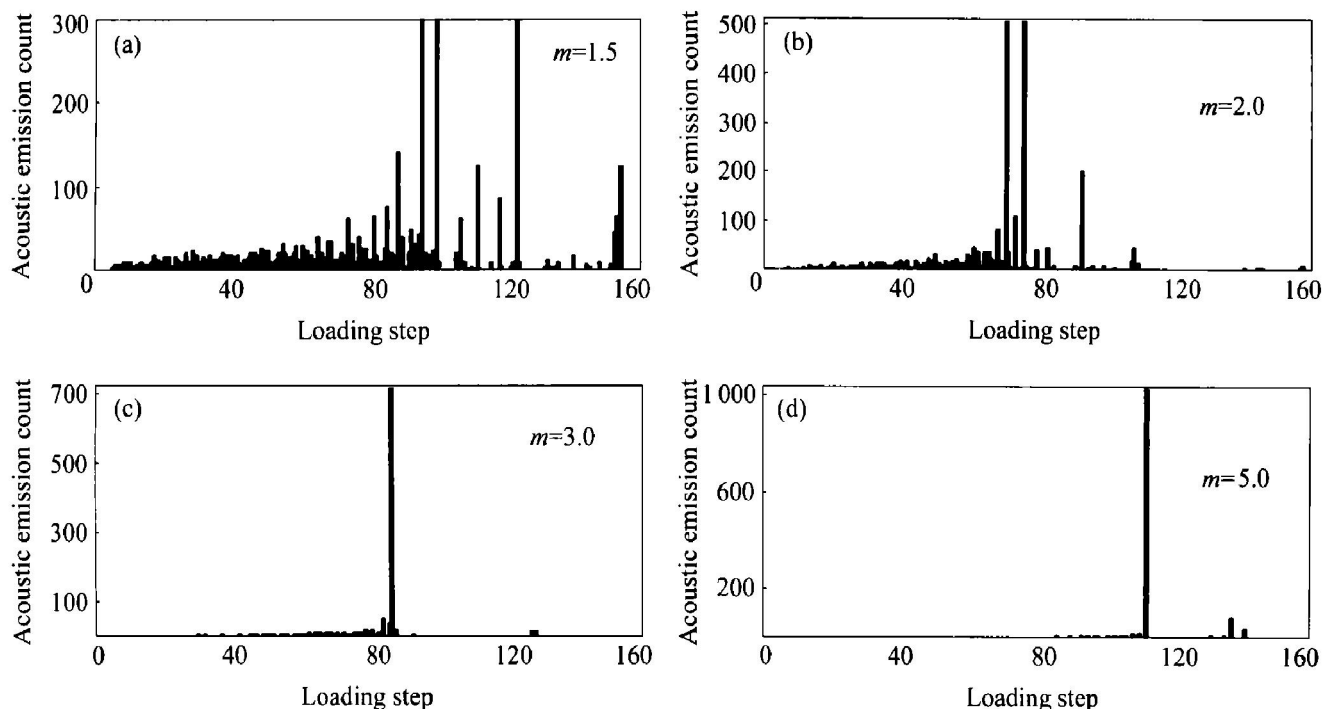


图 6 不同均质度矿柱岩爆的声发射谱

Fig. 6 Influence of heterogeneity on acoustic emission patterns for pillar rock burst (simulated with RFPA^{2D})

5) 随着岩石均质度的增大, 岩爆的激烈程度增强, 声发射现象显著。

6) 岩爆的发生并非在位移应力—应变曲线的峰值点, 而是位于峰值点后应变软化阶段。

REFERENCES

- [1] Chen Z H, Tang C A, Huang R Q. A double rock sample model for rockbursts[J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997, 34 (6): 991 - 1000.
- [2] Tang C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1997, 34: 249 - 262.
- [3] Tang C A. Numerical simulation on progressive failure leading to collapse and associated seismicity [J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 1997, 34(2): 249 - 261.
- [4] Tang C A, Chen Z H, Xu X H, et al. A theoretical model for kaiser effect in rock[J]. Pure Appl Geophys, 1997, 150: 203 - 215.
- [5] Tang C A, Yang W T, Fu Y F, et al. A new approach to numerical method of modeling geological processes and rock engineering problems: continuum to discontinuum and linearity to nonlinearity[J]. Engineering Geology, 1998, 49: 207 - 214.
- [6] Tang C A, Kaiser P K. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release in unstable failure of brittle rock—part I: fundamentals [J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 1998, 35(2): 113 - 121.
- [7] Kaiser P K, Tang C A. Numerical simulation of cumulative damage and seismic energy release in unstable failure of brittle rock—part II: rib pillar collapse [J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 1998, 35(2): 123 - 134.
- [8] Tang C A, Liu H Y, Lee H K K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—part I: effect of heterogeneity [J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 2000, 37: 555 - 569.
- [9] Tang C A, Tham L G, Lee P K K, et al. Numerical studies of the influence of microstructure on rock failure in uniaxial compression—part II: constraint, slenderness and size effect [J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 2000, 37: 571 - 583.
- [10] Kou S Q, Liu H Y, Lindqvist P A, et al. Numerical investigation of particle breakage as applied to mechanical crushing—Part II: interparticle breakage[J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 2001, 38: 1163 - 1172.
- [11] Tang C A. Numerical simulation of rock failure and associated seismicity[J]. Int J Rock Mech & Min Sci, 1997, 34: 249 - 262.
- [12] 谢和平, Pariseau W G. 岩爆的分形特征和机理[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(1): 28 - 37.

XIE He ping, Pariseau W G. Fractal character and mechanism of rock bursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1993, 12(1): 28 - 37.

Numerical simulation on acoustic emission during pillar rock burst

WANG Shan-yong, TANG Chun-an, XU Tao, TAN Zhi-hong

(Center for Rock Instability and Seismicity Research,
Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: The relationship between acoustic emission(AE) parameters and damage variable is obtained by applying the damage theory and microelement statistical strength theory. The simulated results reflect macroscopic failure evolution process induced by microscopic fracture and the spatial as well as the temporal distribution characteristics of acoustic emissions event hypocentre. Especially the heterogeneity of rock is considered, which has a good influence on the AE resulted from the rupture of the rock. Meanwhile, the quiet period and damage recovery property during the process of rock burst are researched, the little micro-seismic events occurring before the strong rock burst can be regarded as the auspice. More importantly, the results presented in this paper illustrate the interdependence of stress, strain, acoustic or seismic emissions, and seismic energy release. With respect to rib pillar collapse, the examples illustrate how failure modes and related seismicity changes as the host rock strength is reduced, and shear deformation are permitted to alter the stress field near or inside the pillars.

Key words: numerical simulation; rock burst; damage; acoustic emission

(编辑 吴家泉)