

岩爆的力学模型及物理数值模拟述评

祝方才¹, 宋锦泉²

(1. 株洲工学院岩土工程研究所, 湖南 株洲 412008;
2. 北京矿冶研究总院工业炸药研究所, 北京 100044)

[摘要] 结合现有的岩爆研究情况, 对岩爆发生机制的力学模型以及在室内实验和数值模拟方面所做的工作进行总结, 介绍可资岩爆借鉴的研究领域, 提出岩爆的研究方向。

[关键词] 岩爆; 力学模型; 数值模拟; 损伤; 蠕变

[中图分类号] TD324.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)03-0083-07

1 前言

岩爆是发生在地下空间的一种特殊动力现象, 主要表现为: 岩石的弹射、抛出, 特征为猛烈、突然, 主要原因是岩体能量的释放。在煤矿中又称为煤爆、冲击地压、岩石突出^[1]。随着地下空间的开发利用及地下矿山的开采, 岩爆(冲击地压)作为一种极其严重的地质灾害越来越引起人们的重视。如何减轻或防止岩爆的危害, 成为许多国家关心的问题之一, 各国为此投入了大量的人力物力进行研究, 防止岩爆的发生, 取得了很大的成就。研究领域由传统的强度理论到应用断裂力学、损伤力学, 直至目前引入非线性科学包括突变理论、分岔理论及混沌理论等, 这些理论从不同角度反映了岩爆的孕育特征。由于岩爆的复杂性, 很难得出一个统一的认识。笔者试图总结前人的研究成果, 结合笔者所做的工作, 对岩爆的发生机制研究情况进行阐述。为了探讨的方便, 将其按力学模型以及岩爆的模拟(包括物理模拟和数值模拟)进行分类, 并提出笔者的一管之见。

2 岩爆的类型

由于岩爆的复杂性, 对不同类型岩爆所提出的

力学机制也不相同。郭然^[2]引用了南非学者关于岩爆的分类, 即岩爆可概括为5类: 应变型岩爆; 弯曲破坏型岩爆; 矿柱型岩爆; 剪切破裂型岩爆; 断层滑移型岩爆。其中在金属矿山以一类和四类岩爆较为多见, 而在煤矿则以二类 and 三类岩爆为多, 断层滑移型岩爆则发生较大的断层带附近。

不同类型的岩爆其研究方法不尽相同, 岩爆的分类有利于对岩爆的发生机制进行更深入的研究。

3 岩爆的力学模型

根据岩爆发生的条件和类型不同, 岩爆工作者提出了各种各样的岩爆发生机制, 笔者称之为岩爆的力学模型。

3.1 试验机-试件模型

试验发现, 有些岩石不能在普通试验机上做出全应力应变曲线, 岩石破坏剧烈, 但在刚性试验机上却能做出, 且岩石破坏过程较为平缓。Jager 等认为: 关键在于其加载刚度小于试件全应力应变曲线后半段斜率, 试验机中积蓄的能量足以使岩石破坏, 如图1所示^[3]。

岩石是一种应变软化材料, 当岩样进入加载后区时, 岩样的承载能力降低, 此时试验机卸载并释放在加载过程中所储存的弹性能, 岩样峰值 A

[收稿日期] 2002-09-05; **修回日期** 2002-11-26

[基金项目] “九五”科技攻关资助项目(96-116-01-01-02)

[作者简介] 祝方才(1972-), 男, 湖北公安县人, 博士, 株洲工学院岩土工程研究所副教授

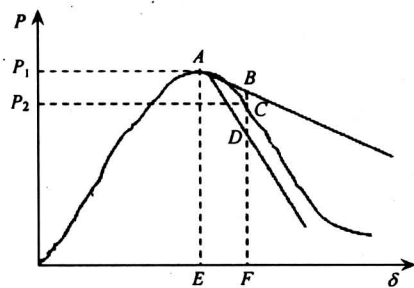


图1 试验机刚度对岩石破坏的影响

Fig.1 Influence of stiffness of test machine on rock failure

点到峰值后区C点时所消耗的能量为四边形ACFE的面积 S_{ACFE} ，当试验机刚度较大（大于岩样峰值后区曲线斜率的绝对值）时，试验机卸载所释放的能量为四边形ADFE的面积 S_{ADFE} ，即 $S_{ACFE} > S_{ABCD}$ ，则岩样稳定破坏，反之则失稳破坏。

布莱克将其推广到岩爆的研究中，提出了岩爆发生的刚度理论^[4]。该理论认为：矿山结构所受载荷达到强度极限；矿山结构体刚度大于矿山负荷系统（围岩）的刚度，满足这两个条件就会发生岩爆。刚度理论虽然具有明确的物理概念，但对于矿山岩体来说，除少数情况以外，很难直接计算岩体刚度，因此就限制了其实际应用。

3.2 矿柱-顶板模型

矿柱-顶板模型借鉴了刚度理论的研究成果，对于柱式开采（如房柱法）来说，顶板-矿柱组成了一个加载系统，徐曾和等^[5]对于这种类型的岩爆利用突变理论进行了分析，并研究了岩爆的延迟效应，其力学模型如图2所示。

矿柱-顶板模型适合于矿柱型岩爆的研究，其模型建立相对较为容易，且概念明确，但尚需进一步考虑岩体的破坏方式。

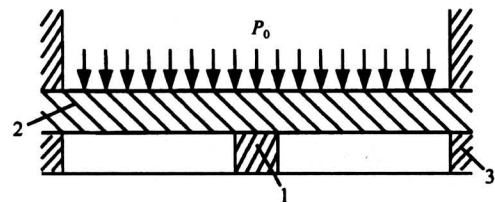
3.3 失稳模型

失稳理论首先由章梦涛教授^[6]引入，其观点是：将矿山岩体看作一个变形系统，变形系统的平衡状态，取决于系统势能泛函的性质，当驻值不为极小值时，其平衡状态是非稳定态。根据岩体所处的力学状态，可将岩体分为弹性区和塑性区（应变软化区）。根据变分原理，对于所研究的岩体，设其形变势能为 U ，则系统不稳定的条件为

$$\delta^2 U = \int_{V_0} \delta \{d\epsilon\}^T D_e \delta \{d\epsilon\} dV +$$

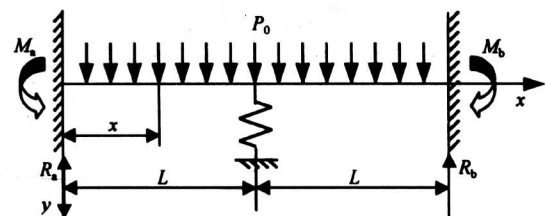
$$\int_{V_i} \delta \{d\epsilon\}^T D_{ep} \delta \{d\epsilon\} dV \leq 0. \quad (1)$$

式中： U 为系统总势能； V_i 为应变软化区体积； V_0 为非应变软化区体积； D_e 为弹性矩阵； D_{ep} 为弹塑性矩阵。



1—矿柱，2—顶板，3—未采矿层

a 矿柱-顶板结构



b 矿柱-顶板力学模型

图2 矿柱-顶板结构及其力学模型

Fig.2 Structure and mechanics model of pillar-hangwall

由于 D_e 为正定矩阵，显然，只有当岩体中出现应变软化区时，式(1)才可能成立。失稳理论实际上是刚度理论的一种推广形式，赵阳升等^[7]利用这一理论对单位载荷作用下岩体中势能的二次变分 $\delta^2 U$ 进行了研究，并根据 $\delta^2 U$ 的相对大小确定岩体失稳程度。

失稳模型是岩爆研究中提出得较早的力学模型，对于岩爆的研究影响较大。从广义上讲，岩爆是岩体失稳破坏的一种表现形式，该模型对于岩爆研究有理论指导意义，但判断这种失稳破坏的形式即是否为岩爆，这一问题还难以解决。

3.4 断裂模型

岩体中存在大量的微裂纹，在外载条件下微裂纹扩展、汇聚形成宏观裂纹，最终导致岩石破坏，其典型的力学模型为层裂板模型，如图3所示。

Dyskin^[8]等认为，岩爆是由于平行于自由表面的裂纹扩展造成的，据此提出了岩爆的断裂力学模型，缪协兴等^[9]在此基础上进一步发展，提出了岩爆的滑移裂纹模型，并考虑了岩爆发生的时间效应。根据损伤力学理论，岩石在外载作用下会发生

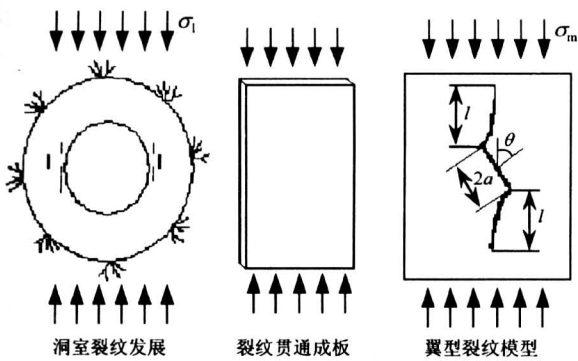


图3 洞室岩爆的层裂板模型

Fig.3 Laminar model of rock burst in chambers

损伤，因此在研究洞室岩爆时应考虑损伤的影响，基于圆形洞室力学意义上的典型性，笔者利用损伤理论研究了其分布特征^[10]，以 Dyskin 提出的层裂板模型为基础，提出了岩爆的损伤断裂力学模型^[11]。层裂模型与现场的洞室型岩爆的观测结果比较吻合。如何计算层裂模型中层裂板的厚度，确定模型计算参数以及岩爆终止的条件还不太清楚。

3.5 分岔模型

分岔模型由 Vardoulakis^[12]提出，利用 Mohr - Coulomb 理论研究了刚塑性无扩容条件下表面失稳的分岔机制，采用的力学模型是压楔实验模型，如图4所示。

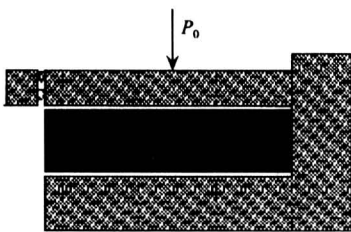


图4 巷道围岩破坏的压楔实验模型

Fig.4 Wedge model of failure of surrounding rock in chambers

压楔实验模型只近似反映了洞室围岩所处的应力状态，且其提出的破坏准则尚待探讨，因此所提出的破坏应力也就难以成为评判指标。但是其利用分岔思想研究岩爆问题具有借鉴意义，目前岩爆研究中探讨较多的突变理论、分岔理论与其在思路上有相似之处。

3.6 蠕变软化模型

岩爆的时间效应一直是岩爆研究关注问题之一，调查发现，岩爆通常在爆破后数小时发生，具

有明显的滞后效应，且岩爆一般是不连续的，如图5所示^[13]。

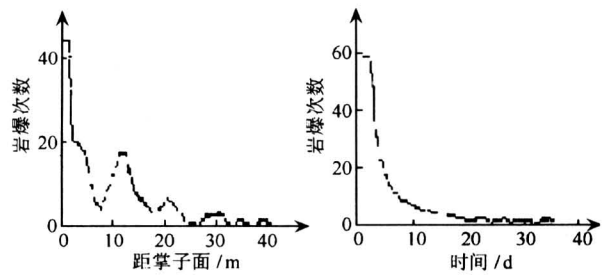


图5 天生桥引水隧洞岩爆频率分布

Fig.5 Frequency of rock burst in water tunnel of Tianshengqiao water power station

对此一些学者利用流变学的观点进行了解释。俄罗斯学者 Linkov 认为^[14]：在失稳点附近，存在蠕变与软化耦合效应，这种作用导致裂纹加速扩展，这可以解释慢速蠕变与瞬间失稳现象。

4 岩爆的物理模拟

由于岩爆的重复性不强，岩爆现场调查研究多是一种后验性的分析，因此在室内进行模拟研究对于认识岩爆具有重要意义。岩爆有两个重要的特征即突发性和动力性，前者是指当围岩应力组合达到某一值突然发生破坏，这种破坏具有时间和空间上的不可精确预测性；其可能由于放炮、附近采场的回采等因素引起，后者是指岩爆发生过程中产生动力载荷破坏支护、施工设备和对工人造成伤害等。如何再现岩爆的动力性，目前有两种方法：其一是利用爆破等冲击载荷来模拟；其二则是选择破坏过程较剧烈的材料。Ortlepp 利用爆破来模拟岩爆动力作用，研究了全长粘结式锚杆的支护效果^[15]。总的说来，目前开展得比较广泛的室内试验是研究不同的应力组合条件下洞室岩爆(主要为应变型岩爆和剪切破裂型岩爆)的特征，其中包括两部分的内容：模拟洞室围岩的应力状态和选择合适的岩爆模拟材料，对此各研究者的侧重点不同。

4.1 洞室围岩应力状态的模拟

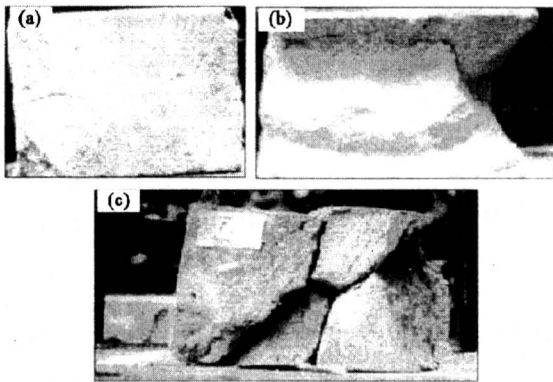
潘一山等^[16]在这方面做了详细的探讨，在材料配比及选择原则上都进行了研究，得出了类似岩爆的实验现象和岩爆的临界载荷。张晓春等^[17]利用煤 - 砂浆混合模型进行了研究，测出圆形、拱形巷道的壁面位移以及煤壁破裂照片。Nakayama 等利用偏斜加载模拟了洞室围岩切向应力的分布，得

出了其声发射分布特征^[18]。

笔者利用 WY-300 型气液稳压器，利用自行设计的真三轴加载设备进行了研究，得出了孔壁应变的测试结果^[19]。

4.2 洞室开挖过程的模拟

许东俊等根据圆形洞室中围岩应力分布研究了不同应力组合情况下岩石的破坏形式，指出洞室围岩可能出现劈裂型和剪切型岩爆^[20]。笔者研究了不同加载应力路径下相似材料的破坏特征，如图 6 所示^[19]。



a 单向卸载, b 双向卸载, c 三轴加载

图 6 不同应力路径下相似材料的破坏特征

Fig.6 Failure modes of simulated material under different stress path

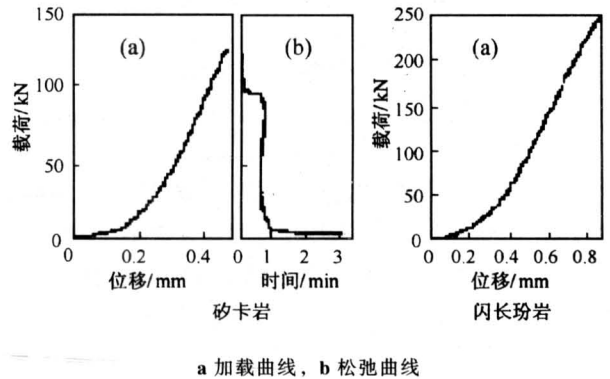
应力路径对于岩体破坏特征有很大的影响，这已被很多研究所证实，因此模拟洞室开挖对于岩爆研究具有重要意义，但是真实模拟开挖过程目前难度较大，除了相似材料的选择外，还有如何实现开挖和测试的问题。

4.3 岩爆的促发机制——本源性岩爆和激励性岩爆

岩爆发生的必要条件包括一定的应力组合条件和岩石的岩爆倾向性，但并不意味着达到该条件时岩爆一定会发生，即上述条件是非充分条件。目前相当多的研究和笔者的现场调查表明，岩爆往往是在满足上述必要条件时由外界扰动所引起的，对于硬岩矿山岩爆来说，主要是采矿活动如放炮和回采等。从能量的观点来看，外界扰动的影响在于岩石在峰值后区时变形破坏所需能量的大小，刚度理论虽然对此做出了合理的解释，但无法反映后区破坏过程进行的快慢。王文星等对此进行了深入的研究^[21]。

实验在中南大学测试中心的 INSTRON 试验机

上进行。采用的控制方式是当载荷达到峰值时保持变形不变，将原变形轴改为时间轴，得到反映松弛过程中载荷变化情况的松弛曲线。试验分为两个阶段：a. 峰值载荷前，按 $3 \mu\text{m/s}$ 的变形速率加载并达到峰值点，得载荷-位移曲线 $P-\delta$ ；b. 载荷达到峰值点马上转变为控制变形方式，横坐标改为时间轴，得载荷-时间曲线 $P-t$ 。这里给出 2 种岩石：矽卡岩和闪长玢岩的试验结果，如图 7 所示。



a 加载曲线, b 松弛曲线

图 7 冬瓜山两种典型矿岩的松弛特征

Fig.7 Relaxation modes of two kinds of rocks in Dongguashan deposit

闪长玢岩达到峰值后，试验机无须继续加载，岩石内部储存的弹性能就可使岩石发生破坏并崩裂，即峰值后破坏不需要外界的能量输入，应力几乎不发生松弛，岩石裂纹的形成和试件崩裂几乎同时发生，无法测出岩石的松弛曲线。而矽卡岩当达到峰值后，控制变形不变，岩石内部的应力将随时间而逐步下降，但下降过程应力随时间呈阶梯状下降，表明岩石内部应力有一个调整的过程，若在该过程中有外界扰动，岩石可能发生失稳破坏。王文星等依据这两种松弛类型，将岩爆划分为本源性岩爆和激励性岩爆^[21]。

笔者发现，若岩石的强度极高，即使是电液伺服刚性试验机也无法做出其峰值后区曲线。在这类岩石加载过程中，由于其强度很高，在达到强度极限时，试验机储存了很大的能量，岩石在峰值后区强度降低，此时即使有极小的扰动，都会造成试验机能量的快速释放而造成岩石失稳破坏。对于强度极高的岩石来说，这一过程进行就相对强度低的岩石进行得剧烈，甚至大于试验机的反馈速度，因此峰值后区的松弛曲线无法得到。而无论用普通试验机还是电液伺服刚性试验机其油压的脉动是不可避免的，因此这一现象具有普遍意义，这就解释了岩

爆现象与采矿活动的关系，即岩爆往往在爆破作业后一段时间内发生。

5 岩爆的数值模拟

岩爆的突发性一直是困扰岩爆工作者的一个重要课题，大多数研究者认为，岩爆从细观上存在一个演化的过程。一些学者对此进行了深入的研究。

5.1 格形单元模型

岩石的结构影响岩石的破坏方式。Mogi 的研究表明^[22]，致密坚硬的岩石破坏猛烈、声发射数在接近破坏前也出现突跃，而裂隙较多，胶结较差的材料声发射呈现稳定增加的情况。从材料损伤的角度可认为，后一种材料损伤程度高，前一种材料损伤程度低。将岩石划分成岩石单元，认为岩石的损伤是岩石单元的破坏过程，根据此研究岩石损伤发展过程。格形单元模型实际上是将材料划分成有限体，形状一般选择规则单元，如三角形单元、矩形单元和长方体单元。Okubo 据此研究了岩石从细观破坏发展到宏观破坏的过程^[23]。唐春安等提出了用均质度描述材料初始损伤的观点，开发了相应的有限元程序 RFPA^[24]，该程序可研究不同初始损伤情况下材料的破坏特征，并可统计加载过程中的声发射。

笔者利用 RFPA 程序研究了均质度对岩石破坏和声发射的影响，发现非均质的模型声发射数呈渐增模式（模型 b），反之则呈突跃模式（模型 a），如图 8 所示。声发射数的研究结果与岩爆材料的声发射特征一致，在破坏特征方面前者表现出渐进破坏模式，后者则发生突然破坏，这与通常研究结果一致。

格形单元模型在模拟岩石破坏特性方面具有很多优点，如研究非均质性、应力状态等，但在反映岩石岩爆倾向性对岩石破坏过程的影响则存在一定的困难。

5.2 弹簧 - 滑块模型

Zou 等认为岩爆是岩石中积累的弹性能突然释放的现象，岩体会沿一个弱面发生剪切破坏，并认为微破裂的扩展最终导致岩体突然破坏，弹簧 - 滑块反映了粘滑效应，在这个过程中会伴随着声发射，并应用弹簧 - 滑块模型研究了岩石在单轴压缩条件下的声发射过程，如图 9 所示^[25]。

弹簧 - 滑块模型很好地模拟了岩石破坏前的声发射平静期以及破坏时的声发射突增现象，但该模

型不能反映岩石力学特性对于破坏的影响。

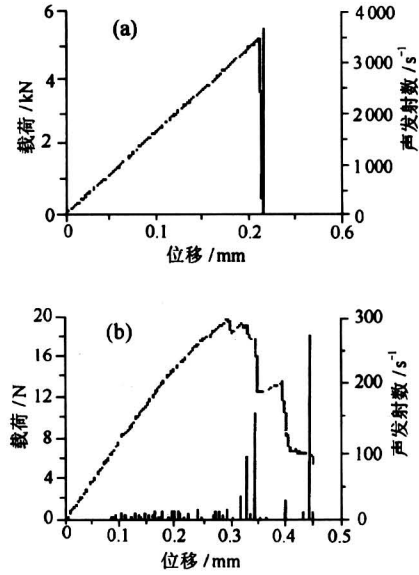


图 8 声发射数 - 载荷 - 位移曲线的数值模拟结果

Fig.8 Results of AE count-load-displacement from numerical simulation

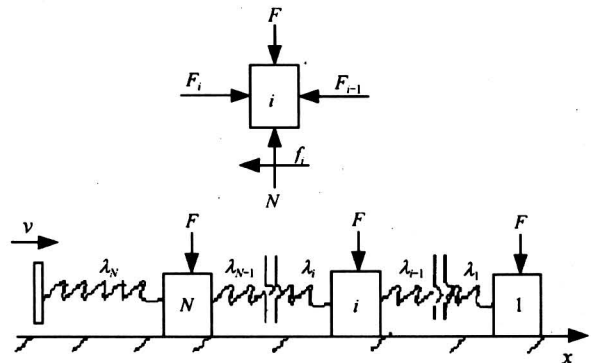


图 9 模拟岩石声发射活动的弹簧 - 滑块模型

Fig.9 Spring-slide block model for AE simulation of rocks under load

5.3 细胞自动机模型

随着岩爆研究的深入，各种非线性科学引入到岩爆的研究当中，周辉等应用该模型研究了外载作用下岩石的响应、声发射和应力应变，加载的方式采用输入能量的方法，得出了岩石破坏的演化过程^[26]。该模型很好地模拟了岩石的声发射特征，也可研究应力应变关系，在这一点上与格形单元模型相似，其存在的问题是如何研究岩石岩爆倾向性等因素对岩爆的影响。

5.4 加卸载响应比模型

尹祥础于1987年提出用加卸载响应比(LURR, load/unload response ratio)研究岩体在加载过程中的力学响应特征,可以较好地反映岩石的破坏过程,其原理如图10所示^[27]。

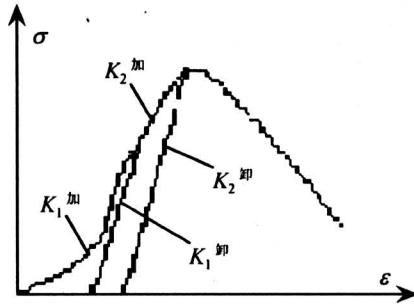


图10 加卸载响应比的力学原理

Fig.10 Mechanical principle of load/unload ratio

在线弹性阶段,加载模量和卸载模量近似相等,而在非线性阶段,材料出现损伤,这时加载模量小于卸载模量,这可以用响应率来表示:

$$\begin{cases} X = \lim_{\Delta P \rightarrow 0} \frac{\Delta R}{\Delta P}, \\ K_{LURR} = \frac{X^+}{X^-}. \end{cases} \quad (2)$$

式中 P 为应力, R 为应变, X 为弹性模量的倒数(即响应率), X^+ 为加载响应率, X^- 为卸载响应率。

王裕仓等利用链网模型实现了LURR的数值计算^[28]。通过研究LURR可以定性研究地震的孕育过程,将其推广到岩爆的研究中,可能为岩爆的孕育研究提供了一个新的思路。

6 结语

笔者针对岩爆的发生机制的研究状况,从岩爆的力学模型及物理数值模拟等方面进行了分析,并进行了分类探讨。

岩爆的研究已在理论上做了相当多的工作,并建立了相应的力学模型,但由于岩石破坏过程的复杂性以及岩体所经历的复杂应力路径,而在已有的力学模型中难以充分反映,从岩爆的预测预报实践来看,目前的工作重点也集中在现场的监测。

笔者认为,现场应用较为可行的方法是用数值计算软件大致划定岩爆危险区域,并利用微震监测预报岩爆,为此需对岩爆倾向性岩石声发射特征及微震定位进行研究,笔者正结合该课题开展工作。

参考文献

- [1] 赵本钧. 冲击地压及其防治 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1995
- [2] 郭然. 有岩爆倾向深埋硬岩矿床采矿理论及其应用研究 [D]. 长沙: 中南工业大学, 2000
- [3] Jager J C, Cook N G W. 岩石力学基础 [M]. 中国科学院工程力学研究所译. 北京: 科学出版社, 1981
- [4] 谢学斌. 硬岩矿床岩爆预测理论与控制技术 [D]. 长沙: 中南工业大学, 1999
- [5] 徐曾和, 徐小荷. 柱式开采岩爆发生条件与时间效应的尖点突变 [J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(2): 17~23
- [6] 章梦涛. 冲击地压失稳理论与数值模拟计算 [J]. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(3): 197~204
- [7] 赵阳升, 孙钧, 章梦涛. 岩体系统失稳的单位载荷法 [A]. 第三届全国岩石动力学学术会议论文集 [C]. 1992, 430~435
- [8] Dyskin A V, Germannovich L N. Model of rock-burst caused by cracks growing near free surface [A]. Rock Bursts and Seism City in Mines [C]. Young (ed). Rotterdam, 1993. 169~174
- [9] 缪协兴, 安里千, 翟明华, 等. 岩(煤)壁中滑移裂纹扩展的冲击矿压模型 [J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(2): 113~117
- [10] 祝方才. 坚硬岩石的岩爆孕育过程研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2001
- [11] 祝方才, 潘长良, 曹平, 等. 冬瓜山矿床岩爆发生机制分析 [J]. 金属矿山, 2002, (2): 20~21, 47
- [12] Vardoulakis I. Rock bursting as a surface instability phenomenon [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract, 1984, 21(3): 137~144
- [13] 周德培, 洪开荣. 太平驿隧洞岩爆特征及防治措施 [J]. 岩石力学与工程学报, 1995, 14(2): 171~178
- [14] Linkov A M. Rock-bursts and the instability of rock masses [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract, 1996, 33(7): 727~732
- [15] Ortlepp W D. Grouted rock-studs as rock burst support [J]. Journal of the South Institute of Mining and Metallurgy, 1994, 94(2): 47~63
- [16] 潘一山, 章梦涛, 王来贵, 等. 地下硐室岩爆的相似材料模拟试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1997, 19(4): 49~56
- [17] 张晓春, 杨挺青, 缪协兴. 冲击矿压模拟试验研究 [J]. 岩土工程学报, 1999, 21(1): 66~70
- [18] Nakayama Y, Inoue A, Tanaka M A, et al. Laboratory experiment for development of acoustic methods to

- investigate condition changes induced by excavation around a chamber [A]. Rock-bursts and Seismicity in Mines [C], Young (ed), Rotterdam, 1993. 383~385
- [19] 祝方才. 不同应力路径下相似材料模型破坏的试验研究 [J]. 中南工业大学学报, 2002, 33(增刊1): 8~11
- [20] 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
- [21] Wang W X, Pan C L, Feng T. Fountain rock-burst and inductive rock-burst [J]. Journal of Central South University of Technology, 2000, 7(3): 130~132
- [22] 唐绍辉. 声发射技术在采场冒顶监测中的应用 [D]. 长沙: 中南工业大学, 1998
- [23] Okubo S, Nishimatsu Y. Computer modeling of stochastic rock failure during uniaxial loading [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstract, 1986, 23(5): 363~370
- [24] 唐春安, 赵文. 岩石破裂全过程分析软件系统 RFPFA-(2D) [J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(5): 507~508
- [25] Zou D H, Hamish D S M. A proposed mechanism of rock failure and rock bursting [A]. Proceedings of Sixth International Congress on Rock Mechanics [C]. Rotterdam, 1987: 1357~1362
- [26] 周辉, 谭运亮, 冯夏庭, 等. 岩体破坏演化的物理细胞自动机(PCA II): 模拟验证 [J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(6): 782~786
- [27] 尹祥础. 地震预测新途径的探索 [J]. 中国地震, 1987, 2(1): 1~7
- [28] 王裕仓, 尹祥础, 彭克银, 等. 加卸载响应比的数值模拟 [J]. 地球物理学报, 1999, 42(5): 669~676

Mechanical Models of Rock Burst and Its Physical & Numerical Modeling Study

Zhu Fangcai¹, Song Jinqun²

(1. Engineering Geology Institute, Zhuzhou Institute of Technology, Zhuzhou, Hunan 412008, China;

2. Industrial Dynamite Institute, Beijing General Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100044, China)

[Abstract] Concerning with status of rock burst study, some comments on rock bursting mechanical models, laboratory experiments and numerical analysis are made. Some research fields related to rock bursting are reviewed. Finally, some views on rock bursting research are put forward.

[Key words] rock burst; mechanical model; numerical simulation; damage; creep

(cont. from p.26)

Development of Aeronautics and Astronautics With Mechanics

Chen Shilu

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

[Abstract] This paper discusses the development of aeronautics and astronautics with mechanics, reveals the development of new branches of interconnected sciences in mechanics, describes the relations of flight mechanics with aerodynamics, structure mechanics, general mechanics and automatic control, and introduces the new branch of flight mechanics—flight dynamics of elastic vehicle.

[Key words] aerodynamics; structure mechanics; general mechanics; automatic control; flight mechanics; flight dynamics of elastic vehicles.