

深井矿山开采中岩爆发生机理及其预测方法研究

李丽娟,曹平,陈瑜

(中南大学资源与安全工程学院,湖南长沙410083)

摘要:岩爆是深井矿山开采中的重要灾害之一.本文从岩爆的发生机理及预测方法等方面,阐述了目前国内外学者的理论研究.简要介绍了岩爆发生机理最常用的理论依据有:强度理论、能量理论和刚度理论;并介绍了岩爆倾向性预测的几种判据:最大主应力判据、最大剪应力判据、能量判据、冲击倾向性判据等.

关键词:岩爆;破坏机理;预测;判据

中图分类号:TD315⁺.1;TD322⁺.1

文献标识码:A

Study on Rockburst Mechanism and Prediction Methods in Deep Mining

LI Li-juan, CAO Ping, CHEN Yu

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: Rockburst is one of important disasters in deep mining. Several theory researches of domestic and foreign scholars are discussed from rockburst mechanism and prediction methods in this paper. Three most common theoretical basis on rockburst mechanism are put forward: strength theory, energy theory and rigidity theory. Meanwhile, some prediction criterions of rockburst proneness are introduced: maximum principal stress criterion, maximum shear stress criterion, energy criterion, bump proneness criterion etc.

Key words: rockburst; failure mechanism; prediction; criterion

0 引言

高地应力区的岩体内部积聚了很大的弹性应变能,在洞室开挖过程中或开挖之后一定时间内,岩体内的应力进行重分布并在洞壁附近产生应力集中,当集中的应力超过岩体的破坏强度时,应变能就会突然释放,岩体发生猛烈的脆性失稳破坏,破坏后的围岩发生爆裂松脱、剥落,岩块发生猛烈

地弹射甚至抛掷,并常常伴有声响,这种岩体破坏形式就是岩爆.轻微岩爆仅剥落岩片而无弹射现象;严重的岩爆可将巨石猛烈抛出,甚至一次岩爆就能抛出数以吨计的岩块和岩片,并可以测到一定级别的地震.岩爆是矿山巷道、交通隧道、水利水电工程地下厂房、引水隧洞等地下工程中的一大地质灾害.它直接威胁施工人员、设备的安全,影响工程进度,已成为世界性的地下工程难题之

一. 本文就深井矿山开采中岩爆发生机理及其预测方法进行讨论文。

目前,已有许多岩爆理论研究,其中主要的包括强度理论、能量理论、冲击倾向理论、刚度理论和失稳理论. 我国自新中国成立以来的半个世纪,唐春安、潘岳、徐曾和、费鸿禄、潘一山、傅鹤林和李玉等学者对突变理论在岩爆中的应用和发展,做出许多贡献. 此外,我国岩石力学工作者还运用分叉理论、耗散结构理论、混沌理论等研究了岩石变形的局部化问题以及岩石力学系统的稳定性问题,推动了我国岩爆及其岩石失稳理论的发展. 谢和平^[1]则利用分形几何学的方法研究了岩爆发生的机制及其预测预报的手段. 谭以安提出了岩爆预测的模糊数学综合评判方法. 除理论研究以外,唐春安等研究开发出具有中国自主知识产权的岩石破裂过程分析 RFPA 数值计算工具,并开发了 ESG 微震监测系统,配置了可视化 RFPA - View 软件,为岩爆等岩石破裂过程失稳研究提供了新的研究手段. 葛德治和卢基锋^[2]应用不连续变形分析法(DDA)进行岩爆行为之不连续数值模拟,对于脆性岩体隧道开挖,能合理地模拟围岩破裂及岩块飞出行为. 近期,在岩爆预测方面,杨莹春和诸静^[3]提出了可拓评判法;X. T. Feng 和 L. N. Wang^[4]提出了人工神经网络方法;姜彤等^[5]提出了灰色系统最优归类模型的应用;冯夏庭和赵洪波^[6]提出了岩爆分类的支持向量机方法;宫凤强和李夕兵^[7]提出了距离判别分析(distance discriminant analysis)方法的应用. 这些方法给岩爆预测提供了新的思路和途径.

1 岩爆发生机理研究

对于岩爆作用机理的理论研究,到目前为止国内外研究学者并未彻底弄清,也未在认识上达成一致的看法. 目前主要有岩石破坏的能量原理、均匀介质中的集中力作用、单力偶和双力偶岩石破坏理论、断层破坏理论、岩石的非线性破坏理论等. 最常用的理论依据^[8-12]有:强度理论、能量理论和刚度理论.

1.1 强度理论

强度理论视岩爆为重分布应力达到岩石强度时而产生的破坏,岩爆形成的力学机制主要包括剪切破坏、张拉破坏、剪切与张拉共同作用破坏、和多种形式组合作用的破坏机理.

1) 剪切破坏机理

E. Hoek 等认为,岩爆是高地应力区洞室围岩

剪切破坏作用的产物. Zoback 教授在解释钻孔崩落现象成因时,也认为类似“岩爆”的孔壁崩落破坏属剪切破坏.

2) 张拉破坏机理

用格里菲斯理论解释,岩爆为拉伸破坏. Martin 和 Haimson 则通过打有圆孔的砂岩板岩进行的单向压缩物理模拟试验,在实验室真实地再现了孔壁崩落现象;他们得出这一现象是由于孔壁应力集中部位的局部破坏所引起的,系张性破裂的产物.

3) 剪切与张拉共同作用破坏机理

我国杨淑清教授等通过天生桥二级水电站引水隧洞相似材料岩爆机制物理模拟试验,总结出岩爆造成围岩劈裂破坏和剪切的两种机制,并且认为它们是二种应力共同作用的产物,即劈裂破坏属脆性断裂,而剪切破坏是岩石应力达到峰值强度状态时的破坏;前者形成的破裂面与洞口边界平行,而后者则与洞口边界斜交,呈对数螺旋形状.

4) 多种形式组合作用的破坏机理

谭以安博士等的研究成果认为,岩爆系渐时破坏过程,其形成过程可分为“劈裂成板—剪断成块—块片弹射”三个阶段. 以王兰生教授为首的“川藏公路二郎山隧道高地应力与围岩稳定性课题组”将岩爆作用与岩石在三向应力条件下的压缩变形破坏全过程加以对照,认为岩爆力学机制可以归纳为压致拉裂、压致剪切拉裂、弯曲鼓折三种基本形式,也可以多种组合方式出现.

1.2 能量理论

从能量的观点来看,岩爆的形成过程是岩体中的能量从储存到释放直至最终使岩体破坏而脱离母岩的过程. 因此,岩爆是否发生及其表现形式主要取决于岩体中是否储存了足够的能量,是否具有释放能量的条件及能量释放的方式等. 岩石在破坏前积聚的变形能 W_e 与破坏后消耗的塑性变形能 W_p 之比 W_{ET} ($W_{ET} = W_e / W_p$),是衡量岩石是否在破坏时产生冲击以及冲击程度的重要指标,岩爆倾向指数 W_{ET} 是波兰 Kidybinski 于六十年代最先提出的.

1.3 刚度理论

从刚度理论的观点来看,岩石的刚度是变数,在强度极限以前的刚度(K_m)为正值,超过强度极限以后为负值(K_s),如果 $K_m < |K_s|$,则试样便发生突然而强烈的破坏,提出了刚度冲击性指标 K_{CF} ($K_{CF} = K_m / |K_s|$),当 $K_{CF} < 1$ 时有冲击的危险

存在. 刚度理论在六十年代中期由库克和霍杰姆提出.

2 岩爆倾向性预测的主要方法

近几十年来, 国内外学者在各个方面对岩爆倾向性预测进行了研究分析, 提出了多种假设和判据, 主要可分为以下几类^[13-18]:

2.1 最大主应力判据

应变型岩爆是地下硬岩矿山采准巷道和大型地下峒室以及土木工程隧道中最常见的一种岩爆. 国内外应变型岩爆实例表明, 岩爆始终呈中心对称在巷道两侧或顶底板两处同时发生, 两岩爆处连线与巷道周围原岩应力场的最大主应力轴线垂直, 即岩爆一般发生在巷道开挖后最大切向应力(最大主应力)处. 根据岩爆发生机理的强度理论假说, 有的岩爆研究者通过统计学方法直接找出工程岩体未开挖前的原岩最大主应力 $\sigma_{1\max}$, 原与完整岩石单轴抗压强度 σ_c 之间的关系式来判断岩爆的倾向性, 其中有代表性的是南非学者 Ortlepp^[4] 提出的岩爆倾向性判据, 见式(1)所示.

$$\sigma_{1\max} \geq (0.25 \sim 0.5) \sigma_c \quad (1)$$

为了便于工程实际应用, 又有学者提出用弹性力学理论计算出的工程围岩周边最大主应力 $\sigma_{1\max}$ 与 σ_c 的比值作为岩爆倾向性的判据.

2.2 最大剪应力判据

剪切破裂型岩爆和断层滑移型岩爆发生的频率虽然较低, 但其破坏性却较大. 库伦破坏准则已经直观地给出了这种岩体破坏的标准, 如式(2)所示.

$$\tau \geq C + \sigma_n \tan \phi \quad (2)$$

式中: τ —剪切或滑移面上绝对剪应力;

C —剪切或滑移面上的固有剪切强度, 即内聚力;

ϕ —静摩擦角;

σ_n —滑动面上的正应力

显然, 当破坏一旦发生, 滑动面上固有的剪切强度降为零, 摩擦阻力由静摩擦阻力降为动摩擦阻力. 剪切或滑动破坏发生前后滑移面上的剪切应力差 $ess = \tau - \sigma_n \tan \phi$ (ϕ 为动摩擦角) 称为超量剪应力, Ryder 等人据此给出了岩爆倾向性的判别指标, 见式(3)所示.

$ess \geq 15 \text{ MPa}$ (断层或节理)

极可能发生破坏性岩爆

$ess \geq 20 \text{ MPa}$ (完整岩石)

极可能发生破坏性岩爆

$$5 \text{ MPa} \leq ess \leq 15 \text{ MPa} \text{ (或 } 20 \text{ MPa)} \quad (3)$$

可能发生破坏性较小岩爆

$ess < 5 \text{ MPa}$ 一般不会发生岩爆

$ess < 0 \text{ MPa}$ 结构面稳定

2.3 能量判据

用爆破方法开挖采矿巷道时, 开挖面上爆破前的牵引力突然降为零, 开挖面外部围岩对面内逐渐降低的支护力所作的功表现为开挖面上的多余能量, 这部分能量称为释放能 W_r . 开挖面上形成的释放能, 以 P 波和 S 波通过周围岩石介质向外传播, 释放能 W_r 的大小直接影响开挖面与围岩的应力场. 鉴于岩石工程一般是逐步形成的, 研究逐步开采时的能量释放率 ERR 更有实际意义. ERR 的计算表达式见式(4)所示.

$$ERR = \frac{dw_i}{dv} \quad (4)$$

式中, dw_i —开挖单元释放的能量;

dv —开挖单元的体积

Cook 较早采用能量判据对南非深部金矿开采的岩爆倾向性进行预测, 经过多年的实践, 能量释放率被证明为预测南非硬岩矿山岩爆倾向性的有效手段之一. 过去, ERR 超过 40 MJ/m^2 便认为岩爆的发生是一个严重的问题. 但是对于一定的能量释放率, 在断裂、岩株及地质不连续面附近开采会使岩爆发生的可能性增加. 现在认为, 深部开采可以利用的 ERR 为 $30 \sim 60 \text{ MJ/m}^2$.

2.4 冲击倾向性判据

冲击倾向性是指矿岩能够聚集弹性应变能并在超过其本身的强度后, 会突然释放的各种物理力学性质的总和. 冲击倾向性是产生岩爆的矿岩体的固有属性, 决定了其产生动态破坏的能力, 是发生岩爆的内因, 也是必要条件. 冲击倾向性判据是国内目前最广泛采用的岩爆倾向性的预测方法, 它主要包括弹性能指标 W_{ET} , 冲击能指标 W_{CF} , 弹性变形指标 K_e , 刚度比指标 K_{CF} , 矿岩动态破坏时间 DT 以及损伤能量指数 W_{ed} . 以往的研究表明:

当采用弹性能指标 W_{ET} 时:

$$\begin{cases} W_{ET} \geq 5.0 & \text{有强烈岩爆倾向性} \\ 2.0 \leq W_{ET} \leq 5.0 & \text{有中等岩爆倾向性} \\ W_{ET} < 2.0 & \text{无岩爆倾向性} \end{cases}$$

当采用冲击能指标 W_{CF} 时:

$$\begin{cases} W_{CF} > 2.0 & \text{有强烈岩爆倾向性} \\ 1.0 < W_{CF} \leq 2.0 & \text{有中等岩爆倾向性} \\ W_{CF} \leq 1.0 & \text{无岩爆倾向性} \end{cases}$$

当采用弹性变形指标 K_e 时:

$$\begin{cases} K_e \geq 0.7 & \text{有岩爆倾向性} \\ K_e < 0.7 & \text{无岩爆倾向性} \end{cases}$$

当采用刚度比指标 K_{CF} 时:

$$\begin{cases} W_{CF} > 1.0 & \text{有岩爆倾向性} \\ W_{CF} \leq 1.0 & \text{无岩爆倾向性} \end{cases}$$

当采用矿岩动态破坏时间 DT 时:

$$\begin{cases} DT < 50 \text{ ms} & \text{有强烈岩爆倾向性} \\ DT = 50 \sim 500 \text{ ms} & \text{有中等岩爆倾向性} \\ DT > 500 \text{ ms} & \text{无岩爆倾向性} \end{cases}$$

当采用损伤能量指数 W_{ed} 时:

$$\begin{cases} K_{ed} \leq 1.0 & \text{有岩爆倾向性} \\ K_{ed} < 1.0 & \text{无岩爆倾向性} \end{cases}$$

3 总结

1) 岩爆是高地应力的产物,它发生的整个过程比较复杂,影响因素较多,不仅与地形地貌、地层岩性、岩石岩体的结构构造、地质构造有关,而且还与地应力大小及其分布规律、作用特征、外界扰动、工程活动的方式方法、深部复杂地质作用等因素有关。所以国内外学者的研究并没有统一的认识,本文阐述了三种最常用的理论依据:强度理论、能量理论和刚度理论,对于深部矿山岩爆发生机理的研究工作提供了一定的科学理论依据。

2) 深部矿山开采中发生岩爆必须具备内外两个条件:岩内储备有足够的弹性应变能和引起破坏的应力集中部位。论文提出的最大主应力和最大剪应力判据正是从应力角度出发考虑的,属岩爆发生的外因;而能量判据和冲击倾向性判据则从弹性应变能角度出发,仅考虑到岩性因素,是发生岩爆的内在条件。

参考文献:

- [1] 谢和平. 岩爆的分形特征及机制[J]. 岩石力学与工程学报, 1993, 12(1): 28-37.
- [2] 葛德治, 卢基峰. 岩爆行为之不连续数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(增): 936-944.
- [3] 杨莹春, 诸静. 一种新的岩爆分级预报模型及其应用[J]. 煤炭学报, 2000, 25(2): 169-172.
- [4] Feng X T, Wang L N. Rock-burst prediction based on neural networks[J]. Trans. Non-ferrous Met. Soc. China, 1994, 4(1): 7-14.
- [5] 姜彤, 黄志全, 赵彦彦, 等. 灰色系统最优归类模型在岩爆预测中的应用[J]. 华北水利水电学院学报, 2003, 24(2): 37-40.
- [6] 冯夏庭, 赵洪波. 岩爆预测的支持向量机[J]. 东北大学学报, 2002, 23(1): 57-59.
- [7] 宫凤强, 李夕兵. 岩爆发生和烈度分级预测的距离判别方法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1013-1018.
- [8] 宋岳. 岩爆问题[J]. 天津地质学会志, 1991, 9(3): 50-55.
- [9] 冯涛, 潘长良, 王宏图, 等. 测定岩爆岩石弹性变形能量指数的新方法[J]. 中国有色金属学报, 1998, 8(2): 352-355.
- [10] 徐林生, 唐伯明. 高地应力与岩爆有关问题的研究现状[J]. 公路交通技术, 2002(4): 48-51.
- [11] 徐林生, 王兰生, 李永林. 岩爆形成机制与判据研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(3): 300-303.
- [12] 蔡美峰, 王金安, 王双红. 玲珑金矿深部开采岩体能量分析与岩爆综合预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 38-42.
- [13] Ortlepp W D, Stacey T R. Rockburst mechanisms in tunnels and shafts[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(1): 59-65.
- [14] 谢学斌. 硬岩矿床岩爆预测与控制的理论和技术及其应用研究[D]. 长沙: 中南工业大学博士学位论文, 1999.
- [15] 唐宝庆, 曹平. 预测预防岩爆的探讨[J]. 山东科技大学学报, 2001, 20(1): 71-73.
- [16] 潘长良, 谢学斌, 曹平. 岩爆预测预报方法[J]. 有色矿冶, 1997(6): 3-5.
- [17] 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.
- [18] 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(1): 49-57.
- [19] 徐林生, 王兰生. 二郎山隧道岩爆岩石力学试验研究[J]. 公路, 2000(12): 6-7.