

基于岩爆发生条件的原岩应力反分析方法

徐连满, 潘一山, 李忠华, 耿琳

(辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

[摘要] 岩体中存在大量的微裂纹, 岩爆发生时, 塑性损伤区内微裂纹扩展生成宏观裂隙, 从而有岩块脱离并崩出。通过测定崩出岩块的厚度, 估算出塑性损伤区深度。统计多个巷道发生岩爆时崩落最大岩块厚度、巷道半径和塑性区半径, 得到崩落岩块厚度与塑性损伤区深度的比值 k_0 的关系式。根据损伤力学和极值点失稳理论, 对圆形洞室岩爆进行解析分析, 进而对岩爆的解析解做了进一步简化, 可通过简单的测量岩爆时巷道半径, 岩石的相关参数, 快速反算出原岩应力的值, 从而形成一种新的原岩应力反分析方法。此方法计算岩爆远场应力值与已有原岩应力实测值基本一致, 对发生岩爆的远场应力分析具有参考价值。

[关键词] 岩爆; 岩块厚度; 原岩应力; 反分析方法

[中图分类号] TD315 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1006-6225 (2011) 03-0059-03

Back Analysis Method of Geo-stress Based on Rock-burst Occurrence Condition

XU Lian-man, PAN Yi-shan, LI Zhong-hua, GENG Lin

(Liaoning University of Engineering & Technology, Fuxin 123000, China)

Abstract: There are amount of cracks in rock body. When rock-burst happens, cracks in plastic damage area extend to be macroscopic fissures and rocks outburst. Thickness of outburst rock could be used to calculate depth of plastic damage area. By statistic of outburst rocks' thickness, roadway radius and plastic area radius, relationship formula of ratio of outburst rocks thickness and depth of plastic damage was presented. According to damage mechanics and instability theory of extreme point, rock-burst mechanical model in round cave was set up and the resolution result was simplified further. Then, by measuring roadway radius and corresponding parameters of rock geo-stress might be back-calculated fast. Thus, a new geo-stress back-analysis method formed. The calculation value of far-field stress by this method in rock-burst was the same with survey value, so it is referable for far-field stress analysis.

Key words: rock-burst; rock thickness; geo-stress; back-analysis method

岩爆是在高地应力条件下地下工程开挖过程中, 硬脆性围岩因开挖卸荷, 导致洞壁应力集中, 致使岩石材料应变软化, 造成储存于岩体中的弹性应变能突然释放, 因而产生爆裂松脱、剥落、弹射甚至抛掷的一种动力失稳地质灾害^[1-2]。

原岩应力亦称初始地应力或地应力, 是存在于地层中未受扰动的天然应力。目前常用测量方法有应力解除法、应力恢复法、水压致裂法和声发射法。以上方法要在钻孔之前做一定的前期分析, 以确定孔位, 需要耗费一定的财力和时间^[3-6]。

在地下工程施工中, 在原岩应力作用下, 损伤区内的岩体中微裂纹失稳扩展形成宏观裂隙, 当岩爆发生时, 有岩块从围岩中脱离而崩出, 崩出岩块的厚度不会大于临界损伤深度, 通过测定崩出岩块的厚度, 依据崩落岩块厚度与塑性损伤区深度的比值 k_0 , 可以计算临界损伤区深度。运用岩体结构稳定性理论方法, 可反演出远场处原岩应力的值。

但由于围岩的自身裂隙发育以及外界干扰等因素影响, 该方法的精度可能稍差, 但是在缺少地应力实测数据的条件下, 不需进行专门的试验, 只需测量岩爆发生时崩出最大岩块的厚度, 即可快速推算出远场地应力的值。此方法计算的原岩应力, 对施工现场进行巷道支护, 预测二次岩爆, 具有参考价值。

1 圆形洞室岩爆的解析分析

应用损伤力学和极值点失稳理论, 根据一般稳定性理论, 导出圆形巷道岩爆的解析解。

设一无支护的圆形巷道内半径为 a , 受远场 R 处原岩应力 p_0 作用。当原岩应力 $p_0 \leq p_1$ 时圆形洞室围岩只产生弹性变形。当 $p_0 \geq p_1$ 时围岩形成塑性区和弹性区, 塑性半径为 b 如图 1 所示。弹性区不发生损伤, 塑性区损伤随应变线性演化, $a \leq r < b$ 为塑性区, $r \geq b$ 为弹性区, 设损伤区不可压缩。

[收稿日期] 2010-11-12

[基金项目] 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 课题 (2010CB226803)

[作者简介] 徐连满 (1984-), 男, 辽宁大连人, 助理工程师, 辽宁工程技术大学硕士研究生, 现从事冲击矿压理论研究。

文献^[7]给出了分段损伤演化方程为:

$$D = \begin{cases} 0 & \varepsilon \leq \varepsilon_c \\ \frac{\lambda \varepsilon_c}{\sigma_c} \left[\left(\frac{\rho^2}{r^2} - 1 \right) \right] & \varepsilon > \varepsilon_c \end{cases} \quad (1)$$

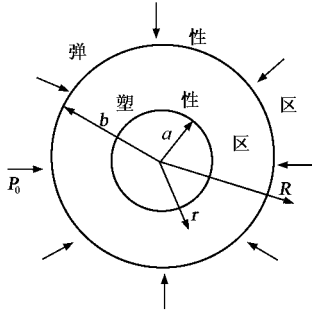


图 1 圆形巷道计算模型

(1) 当原岩应力较小, $p \leq p_1$ 时, 围岩只产生弹性变形。

由弹性理论可求出弹性区的应力解答为:

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{a^2}{r^2} \sigma_r^a + \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) p \\ \sigma_\theta = -\frac{a^2}{r^2} \sigma_r^a + \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) p \end{cases} \quad (2)$$

式中, σ_r 为径向应力; σ_θ 为切向应力。

由边界条件 $\sigma_r^a = 0$, $\sigma_r^b = p$, 按不可压缩计算, 可求出使巷道边缘开始屈服时的原岩应力 p_1 的大小, $p_1 = \sigma_c / \sqrt{3}$ 。

(2) 当 $p > p_1$ 时, 巷道周边开始屈服, 产生塑性区, 塑性区将逐渐从内径 $r=a$ 处向外扩张, 弹性区和塑性区的交界处为 $r=b$ 。

在弹性区与塑性区交界 $r=b$ 处, 损伤 $D=0$, 满足无损莫尔-库仑屈服准则:

$$\sigma_\theta = m \sigma_r + \sigma_c \quad (3)$$

式中, $m = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$, 其中 ϕ 为内摩擦角; σ_c 为单轴抗压强度。

可求得交界处的径向应力为:

$$\sigma_r^b = \frac{2p - \sigma_c}{1 + m} \quad (4)$$

塑性区 $a \leq r < b$ 满足损伤莫尔库仑准则^[8]

$$\widetilde{\sigma}_\theta = m \widetilde{\sigma}_r + \sigma_c \quad (5)$$

式中, $\widetilde{\sigma}_r = \frac{\sigma_r}{1-D}$, $\widetilde{\sigma}_\theta = \frac{\sigma_\theta}{1-D}$ 。

可得:

$$\sigma_\theta = m \sigma_r + (1-D) \sigma_c \quad (6)$$

由巷道自由边界 $\sigma_r^a = 0$, 可得到塑性区内径向应力 σ_r 的解:

$$\sigma_r = \sigma_c \frac{1 + \lambda/E}{m-1} \left[\left(\frac{r}{a} \right)^{m-1} - 1 \right] + \frac{\sigma_c}{(m+1)E} \left[\left(\frac{b}{r} \right)^2 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \left(\frac{r}{a} \right)^{m-1} \right] \quad (7)$$

弹性区与塑性区交界处, 径向应力 σ_r 是连续的, 因此有:

$$\sigma_c \frac{1 + \lambda/E}{m-1} \left[\left(\frac{r}{a} \right)^{m-1} - 1 \right] + \frac{\sigma_c}{(m+1)E} \left[\left(\frac{b}{r} \right)^2 - \left(\frac{b}{a} \right)^2 \left(\frac{r}{a} \right)^{m-1} \right] = \frac{2p - \sigma_c}{1+m} \quad (8)$$

则得出塑性区半径 b 和巷道远场处地应力 p 的关系式:

$$p = \frac{\sigma_c (m+1) (1 + \lambda/E)}{2(m-1)} \left(\frac{b}{a} \right)^{m-1} - \frac{\sigma_c \lambda/E}{2} \left(\frac{b}{a} \right)^{m+1} - \frac{\sigma_c (1 + \lambda/E)}{m-1} \quad (9)$$

(3) 根据一般稳定性理论, 当一个系统所受载荷和系统位移组成的平衡路径中, 存在一个最大载荷值, 达到最大载荷后, 系统失去稳定性, 在极值点处将产生失稳, 对于圆形巷道失稳即发生岩爆^[9], 则得出巷道发生岩爆的条件:

$$\frac{dp}{db} = 0 \quad (10)$$

可得到塑性区半径 b 的大小和巷道发生岩爆的临界载荷 p 的关系

$$\frac{p}{\sigma_c} = \frac{1}{m-1} \left[\frac{(b/a)^{m+1} - (b/a)^3}{(b/a)^2 - 1} \right] \quad (11)$$

由此式可见, 岩爆发生的临界载荷值与岩石的材料参数内摩擦角 ϕ , 岩石抗压强度 σ_c , 以及围岩的塑性半径与巷道半径比值 b/a 有关。

2 岩爆远场原岩应力反分析方法

由式 (11) 知, 由巷道半径 a 和塑性区深度 b 即得到塑性区半径和巷道半径之比 b/a 以及围岩岩体的内摩擦角 ϕ 、抗压强度 σ_c , 就可计算岩爆处的远场原岩应力 p 。

在工程实际中, 岩爆发生时, 由于塑性损伤区内的岩体中微裂纹失稳扩展形成宏观裂隙, 有岩块从围岩中脱离而崩出, 崩出岩块的厚度不会大于临界损伤深度。

如通过测定崩出岩块中的岩块最大厚度 d 通过系数换算, 得出临界塑性损伤区深度 $(b-a)$, 则可求出塑性区半径和巷道半径之比 b/a 进而算出岩爆处的远场原岩应力 p 。

设巷道岩爆崩落出最大岩块的厚度为 d 则 $d \leq (b-a)$, 令

$$d = k_0(b - a) \quad (12)$$

式中, k_0 表示崩落最大岩块的厚度与塑性损伤区深度的比值。极限情况: 塑性损伤区内的岩石整体完全崩落, 则 $k_0 = 1$ 。如能根据巷道现场具体情况, 依据经验得出 k_0 的值, 即能求出塑性半径 b 。

将式 (12) 代入到式 (11) 中, 整理得到

$$\frac{p}{\sigma_c} = \frac{1}{m-1} \left[\frac{(1+d/k_0 a)^{m-1} - 1}{1 - (1+d/k_0 a)^{-2}} \right] \quad (13)$$

因此, 要求远场处地应力的 p 大小, 需根据岩爆发生时, 围岩的岩石参数等数据, 确定出崩落最大岩块的厚度与塑性损伤区深度的比值 k_0 。

统计了多个煤矿巷道, 金属矿巷道和水利及道路隧道发生岩爆时, 测量现场崩落岩块的厚度 d 、巷道半径 a 和塑性区半径 b 。结合岩石内摩擦角 ϕ , 抗压强度 σ_c , 以及抗拉强度 σ_t 等数据, 根据 d 与 $(b-a)$ 之间的规律, 得到了岩爆崩落岩块的最大厚度与塑性损伤区深度的比值 k_0 的关系式

$$k_0 = 0.07m e^{\frac{\sigma_t}{\sigma_c}} \quad (14)$$

在岩爆发生的巷道, 测出崩落最大岩块的厚度 d 、岩石的内摩擦角 ϕ , 岩石抗压强度 σ_c , 以及抗拉强度 σ_t , 由式 (14) 算出 k_0 。

将 k_0 、岩块厚度 d 、巷道半径 a 、岩石的内摩擦角 ϕ 、岩石抗压强度 σ_c 代入式 (13) 中, 即可算出远场原岩应力 p 。

3 实例分析

某金矿处于高地应力区, 目前已进入深部开采, -590m 处最大主应力达到 108.4MPa。巷道半径 1.8m, 在巷道施工过程中, 遇到岩爆发生, 崩落的岩块多呈薄片、透镜、棱板状或板状等, 均具有新鲜的弧形断口、楔形断口和贝壳状断口。测得岩块厚度最大达到 90mm。根据现场岩体参数: 抗压强度 $\sigma_c = 138.4\text{MPa}$, 抗拉强度 $\sigma_t = 7.74\text{MPa}$, 内摩擦角 $\phi = 34^\circ$, 代入式 (14) 得到 $k_0 = 0.25$, 将其代入式 (13) 算出原岩应力 $p = 104.8\text{MPa}$ 。

某水电站处于我国西南高应力区, 实测最大应力值达 42.11MPa。引水隧洞半径 5.5m, 发生岩爆

处的岩块厚度最大达到 100mm。根据现场岩体参数: 抗压强度 $\sigma_c = 78\text{MPa}$, 抗拉强度 $\sigma_t = 4.1\text{MPa}$, 内摩擦角 $\phi = 50.17^\circ$, 代入式 (14) 得到 $k_0 = 0.54$, 将其代入式 (13) 算出原岩应力 $p = 45.1\text{MPa}$ 。

将计算得到的原岩应力与已有的原岩应力测量值进行比较, 实测原岩应力与计算所得应力值基本接近。

4 结论

采用损伤力学和极值点失稳理论, 通过统计得出的岩爆现场崩落岩块的厚度与塑性损伤区深度的比值 k_0 , 将岩爆的解析解进一步简化, 可快速计算出原岩应力值, 形成一种岩爆远场原岩应力反分析方法。

该方法运用到岩爆发生的工程中, 求得原岩应力与测量值基本相等。

[参考文献]

- [1] 李忠华, 官福海, 潘一山. 基于损伤理论的圆形巷道围岩应力场分析 [J]. 岩土力学, 2004, 25 (S2): 160—163.
- [2] 齐庆新, 陈尚本, 王怀新, 等. 冲击地压、岩爆、矿震的关系及其数值模拟研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22 (11): 1852—1858.
- [3] 贾喜荣. 矿山岩层力学 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1997.
- [4] 景 锋, 盛 谦, 张勇慧, 等. 中国大陆浅层地壳实测地应力分布规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (10): 2056—2062.
- [5] 高 峰. 地应力分布规律及其对巷道围岩稳定性影响研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2009.
- [6] 岳晓蕾. 大岗山地应力反演与工程应用研究 [D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [7] 潘一山. 冲击地压发生和破坏过程研究 [D]. 北京: 清华大学, 1999.
- [8] 李忠华, 潘一山. 钻屑法孔壁破坏失稳现象研究 [J]. 煤矿开采, 2005, 10 (2): 61—62.
- [9] 潘一山, 徐秉业. 考虑损伤的圆形洞室岩爆分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18 (2): 152—156.

[责任编辑: 王兴库]

(上接 34 页)

- [47] B·Benkabbour, E·A·Toto, Y·Fakir. Using DC resistivity method to characterize the geometry and the salinity of the Plioquaternary consolidated coastal aquifer of the Manouba plain, Morocco [J]. Environmental Geology, 2004 (45): 518—526.
- [48] Loke M H, Barker R D. Practical techniques for 3-D resistivity surveys and data inversion [J]. Geophysical Prospecting, 1996

(44): 499—523.

- [49] Sasaki Y. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation [J]. Geophysical Prospecting, 1996 (44).
- [50] 黄俊革, 阮百尧, 王家林. 坑道直流电阻率法超前探测的快速反演 [J]. 地球物理学报, 2007, 50 (2): 619—624.

[责任编辑: 邹正立]