

岩石破裂声发射过程的围压效应*

陈忠辉 傅宇方 唐春安

(东北大学 沈阳 110006)

摘要 针对由于地下开挖引起的岩石声发射率突增及最小主应力减小可能引起地震等地质现象,利用统计损伤理论对岩石破裂过程中声发射率的时间序列特征,特别是三维应力下岩石的快速卸围压对声发射的影响进行了理论探讨。结果表明:三维应力下岩石快速卸围压,促使声发射率突增,而在一定范围内快速增加围压,声发射并不发生,只有增加一定轴压,才会有声发射的产生,这些结果在计算机上得到了很好的模拟,并与实验结果相吻合。

关键词 声发射,围压效应,岩石破裂

1 引言

地壳中的天然岩石一般处于三维应力状态,然而在工程开挖形成地下结构或进行采掘矿产时,势必造成地下结构周边围岩由初始的三维应力状态向二维或一维应力状态转化,岩石在应力状态由高维向低维转变过程中,其应力特性就变得异常复杂。因此研究岩石由三维应力作用向二维或一维应力作用转化过程中的声发射特征,具有一定的理论和工程实际意义^[1,6]。文[2]在实验基础上探讨了等应力球张量加载过程以及最大主应力和最小主应力同时减小等不同应力途径实现三维应力向二维应力转化时的声发射变化特征。文[3]从最小主应力和中等主应力减小引起的岩石破裂中研究了地震的震源机制。文[3-4]则研究了不同围压对岩石声发射 Kaiser 效应的影响。本文利用细观统计损伤的观点,推导出三维应力下岩石本构关系。对岩石破裂过程中的声发射率时间序列进行了理论探讨,特别是岩石在三轴应力状态下,快速卸围压和快速增围压过程中声发射率的变化特征。并利用计算机对其过程进行了仿真。最后应用实验结果验证了理论假设。

2 具有围压作用的岩石本构关系理论模型

岩石在地壳中经历了长时间的地质作用,其内部不可避免地存在许多缺陷(损伤)。假设可以人为地把岩石分成若干个含有不同缺陷的微元,微元被划分得如此小以至对微元作如下的假定:

- (1) 假定微元符合广义虎克定律;
- (2) 假定微元破坏符合密瑟土屈服准则。由于微元所含的缺陷不等,微元强度也就不

1995年7月4日收到初稿,1995年8月21日收到修改稿。

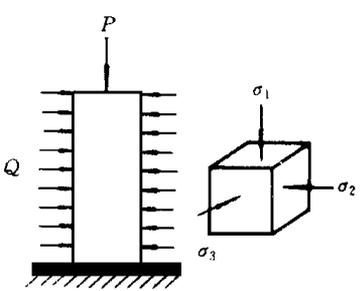
* 本文为国家自然科学基金(资助号 19472018)和国家教委跨世纪人才基金的资助项目

一样, 假定微元一维强度符合 Weibull 统计分布规律^[5]:

$$Q(\epsilon) = \frac{m}{\epsilon_0} \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^{m-1} \exp\left[-\left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^m\right] \quad (1)$$

m 、 ϵ_0 分别为 Weibull 分布标度和形态参数, ϵ 为岩石微元的应度, $Q(\epsilon)$ 是岩应变为 ϵ 时微元破坏概率。

在图 1 力学模型中取出一微元, 受围压应力 $\sigma_2 = \sigma_3$ 作用如图 2, 假定符合线弹性广义虎克定律



$$\begin{cases} \sigma_1 = (\lambda + 2G)\epsilon_1 + \lambda\epsilon_2 + \lambda\epsilon_3 \\ \sigma_2 = \lambda\epsilon_1 + (\lambda + 2G)\epsilon_2 + \lambda\epsilon_3 \\ \sigma_3 = \lambda\epsilon_1 + \lambda\epsilon_2 + (\lambda + 2G)\epsilon_3 \end{cases} \quad (2)$$

上式中 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 分别是微元所受的三个主应力和主应变, λ, G 是拉梅常数。为了计算方便, 采取泊松比 $\mu = 0.25$, 那么由式(2)得

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\sigma_2}{2E} - \frac{\sigma_3}{2E} \quad (3)$$

图 1 岩石试样受围压作用及微元受力示意图

Fig 1 Sketch of rock specimen and local element

式中 E 为微元弹模(假定所有微元弹模相等), 由于微元破坏符合密瑟士屈服准则:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_0^2 \quad (4)$$

其中 σ_0 为岩石微元单轴强度, 当 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时, 上式可变为

$$|\sigma_1 - \sigma_3| = \sigma_0 \quad (5)$$

当图 1 中微元屈服断裂时, 由式(3), (5)可得以下

关系:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma_0}{E} + \frac{\sigma_3}{2E} \quad (6)$$

$\frac{\sigma_0}{E}$ 为微元在单轴应力作用下断裂时的应变, 它符合式(1)的统计分布。

在连续介质损伤力学中三维线弹性各向同性损伤本构方程可表示为下式:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1+\mu}{E} \frac{\gamma_{ij}}{1-D} - \frac{\mu}{E} \frac{\sigma_{kk}}{1-D} \gamma_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (7)$$

式中 D 为损伤参量, 当泊松比 $\mu = 0.25, i = j = 1, \sigma_2 = \sigma_3$ 时由上式得轴应力与轴应变之间关系式

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}\sigma_3 + E(1-D)\epsilon_1 \quad (8)$$

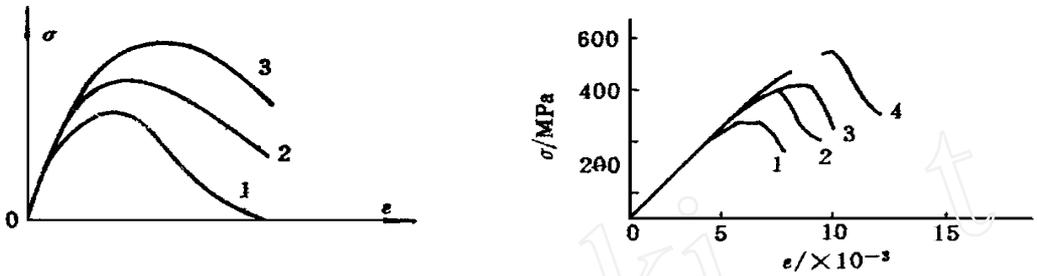
根据连续介质损伤力学, 损伤参量 D 可定义为损伤面积与无损时材料全面积之比:

$$D = \frac{S}{S_m} = \int_0^{\epsilon} Q(x) dx \quad (9)$$

式中 S, S_m 分别为岩样的损伤面积和无损时材料全面积。因此从式(1)、(6)、(8)和(9)得三维应力下轴应力和轴应变之间本构关系式

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}\sigma_3 + E\epsilon_1 e^{-\left(\frac{\epsilon_1 - \frac{\sigma_3}{2E}}{\epsilon_0}\right)^m} \quad (10)$$

图 2a 就是不同围压下岩石应力—应变本构关系理论曲线。曲线 1, 2, 3 分别代表低围压、中等围压及高围压下应力—应变理论曲线。从图中可看出: 随着围压的不断升高, 岩石峰值强度也随之增大, 且应变硬化阶段初期在不同围压下的本构曲线基本重合, 这一特性与图 2b 中的实验结果相吻合^[7]。岩石应力—应变曲线是由一组硬的细粒安山岩熔岩测得的, 曲线 1, 2, 3, 4 分别代表围压为 10.4, 10.4, 20.7, 27.6 及 34.5 MPa 时的应力—应变曲线。



(a) 不同围压下岩石理论本构曲线 (b) 不同围压下岩石实验曲线

图 2 理论与实验结果比较

Fig 2 Result comparison of theory and experiment

3 岩石声发射的围压效应

目前人们对岩石声发射规律的研究, 一般只局限于定性阶段, 其目的是用岩石在实验室各种加载条件下所产生的声发射规律作为依据来研究预测、预报岩石工程破坏进程及地震发生的前兆。岩石声发射可定义为岩石在变形过程中, 由于微破裂(微损伤)使聚集的能量突然释放而产生的一种弹性波, 显然那些微破裂是材料内部微损伤的结果, 因此, 文[5]提出在声发射和岩石损伤之间存在着必然联系, 换句话说, 声发射活动代表着岩石微损伤程度。

当微元所受的应力 σ_1 和 σ_3 符合式(5)时就发生破裂, 本文假定微元一旦破裂, 就产生一定数量的声发射。因此岩样在变形过程中产生的声发射由式(1), (6)得

$$Q(\epsilon) = \frac{m}{\epsilon_0} \left[\frac{\epsilon_1 - \frac{\sigma_3}{2E}}{\epsilon_0} \right]^{m-1} \exp \left[- \left[\frac{\epsilon_1 - \frac{\sigma_3}{2E}}{\epsilon_0} \right]^m \right] \quad (11)$$

$Q(\epsilon)$ 为岩样受轴应变 ϵ_1 、径向应力 σ_3 时产生声发射的概率, 考虑到微元强度分布的随机性, 式(11)乘一个[0, 1]之间变化的随机数, 其值可由计算机赋予, 那么上式可变为:

$$Q(\epsilon) = RND(\epsilon_1) \frac{m}{\epsilon_0} \left[\frac{\epsilon_1 - \frac{\sigma_3}{2E}}{\epsilon_0} \right]^{m-1} \exp \left[- \left[\frac{\epsilon_1 - \frac{\sigma_3}{2E}}{\epsilon_0} \right]^m \right] \quad (12)$$

$RND(\epsilon_1)$ 为随轴应变 ϵ_1 变化的一个随机数。在式(10)基础上, 可利用计算机绘出岩石试样在不同围压条件下破裂过程中应力—应变曲线和声发射数—应变图。图 3 就是同种岩样在无围压、中等围压和高围压下应力—应变曲线和声发射数—应变理论图。从图中显示出在加载过程中应力—应变特征和声发射数有很强的相关作用。其声发射活动特性和岩样的非

弹性应变间接地反映了脆性岩石的损伤程度。

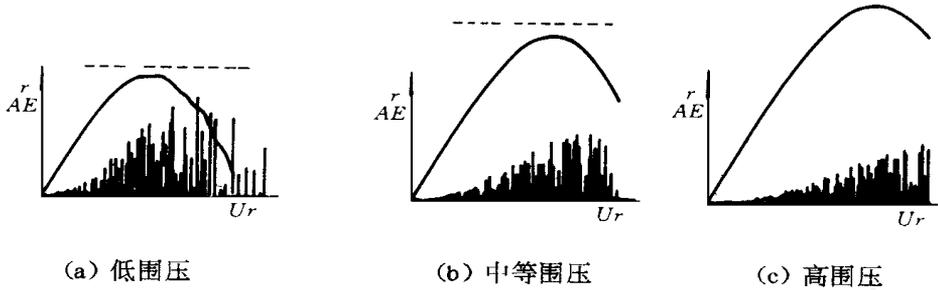


图 3 不同围压下声发射率的时间序列理论模型

Fig. 3 Theoretical model of time sequence of AE under different confining pressures

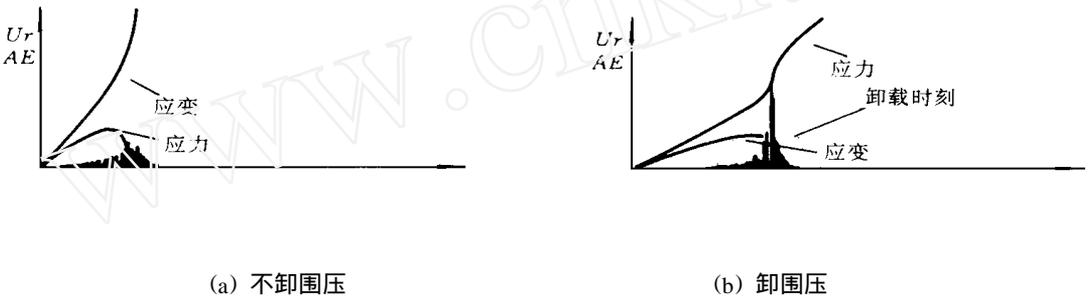


图 4 卸围压时声发射率时间序列

Fig. 4 Time sequence of AE under unloading of confining pressure

微元一旦破裂就不能恢复其强度，也就是岩样变形过程中损伤是不可逆的，变形增加伴随着微元破裂。由于岩样的微元数是恒定的，因此假定岩样在不同围压条件下破裂过程所产生的全部声发射数 N_m 是恒定的，那么式 (12) 可以用累积声发射数 N 表达。

$$N = N_m \int_0^{\epsilon_1} \mathcal{Q}_x dx \tag{13}$$

图 4 就是用计算机仿真绘出的岩样在围压作用下加载到某一时刻，突然卸围压的声发射全过程序列，图中清楚地显示出声发射突增的规律，从细观微元角度考察一下其原因，微元在围压 σ_3 作用下，只有当轴应变 $\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} + \frac{\sigma_3}{2E}$ 时才破裂，而在单轴应力状态下，只要应变 $\epsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E}$ 时就发生破裂，显然围压提高了微元的破裂强度。因此，当对岩样快速卸围压时，原本一些在围压状态下尚未达到破裂强度的微元，在单轴状态下却达到了单轴破裂强度，所以这些微元也就突然破裂而产生声发射，相反增加围压，使微元破裂强度得到普遍提高，只有当轴应变在原有的基础 $\frac{\sigma_1}{E}$ 上，再增加应变 $\frac{\sigma_3}{2E}$ 才能使这一微元破裂。而在实际模型中，当对岩样快速增围压时，轴应变发生回弹，在此期间也就没有微元破裂，因而不

会有声发射产生, 只有当轴压增加到一定程度时, 才会有声发射(图 5)。

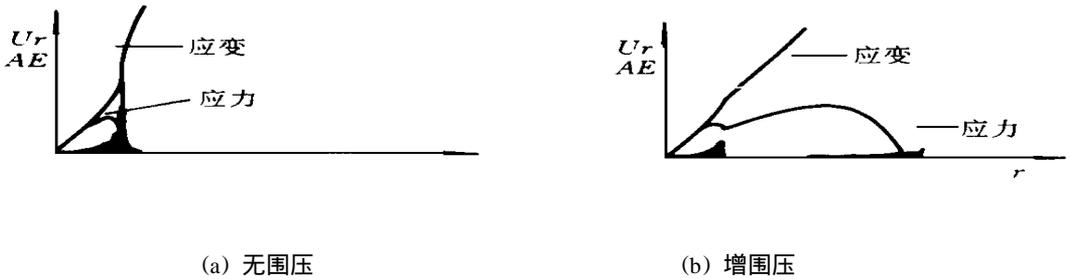


图 5 岩样增围压时的声发射率时间序列

Fig 5 Time sequence of rock AE under loading of confining pressure increased

图 6 是 Holcomb 所做的大理岩增围压而后增轴压所产生的声发射序列图。图中明显地显示出围压的增加使声发射发生后移现象, 这和理论结果相吻合。

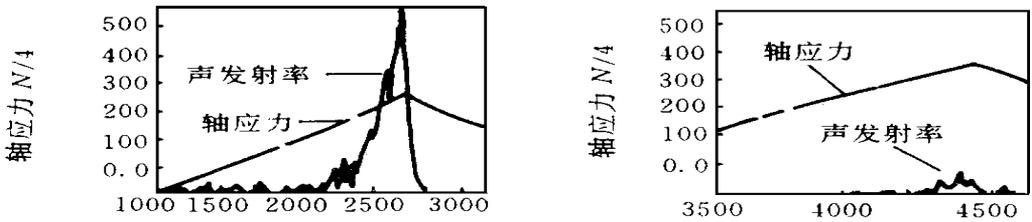


图 6 在增围压下声发射率的实验结果

Fig 6 Experimental result of rock AE under loading of confining pressure increased

4 结论

近几年在岩石声发射规律研究方面尽管已取得了一定进展, 但很少涉及到结合定量的理论分析。本文用统计损伤力学观点推导出在围压作用下岩石应力应变本构关系理论表达式, 并探求了岩样在快速增、卸围压时的本构特性, 在此基础上, 得到了岩样在快速增、卸围压时的声发射变化特征, 结果表明: 围压作用下的岩样快速卸围压, 促使声发射突增, 而在一定范围内快速增围压, 声发射并不发生, 只有增加一定的轴压后, 才会有声发射, 这些特征和实验结果非常吻合。

参 考 文 献

- 1 Lockner D. The role of acoustic emission in the study of rock fracture. *Int. J. Rock Mech. Min. Geomech. Abstr.*, 1993, 30(7): 883- 899
- 2 陈晓文, 周昌达, 许昭永. 由三向转变为二向应力状态岩石的声发射. 见: 第二次全国岩石力学与工程学术会议论文集. 北京: 知识出版社, 1989, 554- 559
- 3 耿乃光. 应力减小引起地震. *地震学报*, 1985, 7(4): 430- 437

- 4 秦四清, 李造鼎, 张倬元, 邓荣贵 岩石声发射技术概论 成都: 西南交通大学出版社, 1993, 80- 85
- 5 Tang Chun an, Hudson J A and Xu Xiaohu Rock failure instability and related aspects of earthquake mechanisms Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1993, 17- 60
- 6 唐春安, 费鸿禄, 徐小荷 巷道表面岩爆的围压效应 见: 第二届全国青年岩石力学与工程学术研讨会论文集 北京: 中国科学出版社, 1993, 49- 53
- 7 耶格 J C, 库克 N C 岩石力学基础 北京: 科学出版社, 1980, 217- 227
- 8 Holcomb D J and Costin L S Detecting damage surfaces in brittle materials using acoustic emissions J. Appl Mech , 1986, 208: 536- 544

CONFINING PRESSURE EFFECT ON ACOUSTIC EMISSIONS DURING ROCK FAILURE

Chen Zhonghui Fu Yufang Tang Chun an
(Northeastern University, Shenyang 110006)

Abstract Based on the phenomenon that acoustic emissions (AE) increase suddenly because of underground excavation, time sequence of AE rate during rock failure has been discussed by using statistical damage theory. Especially increasing or decreasing confining pressure results in variance of AE under three dimensional stresses. The results show that decreasing confining pressure sharply brings out increasing AE sharply. On the other hand, few AE emit when confining pressure increases sharply, and AE occur again only when axial pressure increases. These results have been well simulated with computer and agree well with experimental results.

Key words acoustic emissions, confining pressure effect, rock failure

下期内容预告

下一期《岩石力学与工程学报》将发表下列内容的文章: (1) 裂隙网络、充水压力隧洞、群井降水及力学与渗流的耦合分析; (2) 软岩强度及软岩巷道的支护; (3) 岩石断口分析与岩石抗剪试验及其参数分析; (4) 地基处理及讨论文章。