

# 应变波对岩体的损伤作用和爆生裂纹传播

王家来 徐颖

(中国矿业大学 徐州 221008)

**摘要** 给出了应变波作用下岩体损伤累积计算方法,将爆破过程中应变波的动力作用和爆生气体的准静压作用结合起来,分析爆生裂纹传播的全过程,修正了以往理论,并揭示了 Kutter 等人所说的应力波对岩体预载荷作用<sup>[1]</sup>的力学本质。

**关键词** 损伤 应变波 有效应力强度因子

**中图分类号** O346.5

## 1 引言

炮孔内装药爆炸后,先向岩体内传播冲击波,它在炮孔壁周围形成密集的径向裂纹网。冲击波很快衰减成应力波,它将远远超前于爆生裂纹的发展。因此,在爆生裂纹的计算中<sup>[2]</sup>,人们往往忽视了应力波(及其产生的应变波)超前传播的力学效应——对岩体的损伤。因而所得的结果必然与实际有所差别。事实上,由于应变波的损伤作用,岩体的微观、细观结构已有所改变,如产生许多新的微裂纹和老裂纹的长大,必将对随后传播而来的裂纹的扩展有所影响。这一点,早在1971年就被 Kutter 和 Fairhurst<sup>[1]</sup>注意到,他们认为应力波可以使岩体起到预载荷的作用,从而使炮孔压力更有效。

我们将着重分析应变波损伤作用后的岩体断裂过程,并与以往的理论结果相比较,以揭示 Kutter 等所说的预载荷作用的力学本质。

## 2 应变波作用下的岩体损伤累积

### 2.1 应变波作用下的岩体损伤

原岩中含有大量原生裂纹,裂纹的长度和方位在空间上随机分布。承受外荷载时,一些裂纹被激活并扩展。在一定强度应变波作用下所激活的裂纹数服从指数分布<sup>[3]</sup>:

$$n(\varepsilon) = A\varepsilon^m \quad (1)$$

式中: $n(\varepsilon)$ 是被激活的裂纹数; $\varepsilon$ 是应变波产生的体积应变; $A, m$ 是材料系数。

设裂纹扩展速度为常数  $c_g$ ,则单条裂纹所影响的球体体积为

$$V(t) = (4/3)\pi(c_g t)^3 \quad (2)$$

$t$  时的损伤为

$$D(t) = \int_0^t \dot{n}(\varepsilon) V(t-\tau) d\tau = \frac{4}{3} \pi c_g^3 A m \int_0^t \varepsilon^{m-1} \varepsilon(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

当损伤发生后,岩体的应力应变关系为

$$\sigma_{ij} = K(1 - D)\varepsilon\delta_{ij} + 2G(1 - D)(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon\delta_{ij}) \quad (4)$$

式中  $K, G$  为弹性常数。

## 2.2 应变波损伤计算

由式(3)知,要获得岩体中每一点的损伤值,必须知道该点处应变及应变率。由于难以获得冲击荷载下的岩石本构关系,这个问题较为棘手。已有的数值模拟<sup>[3]</sup>过于庞大。因此,我们采用经验与理论相结合的办法,给出应变波的简捷求法。

### 2.2.1 球形药包

球形应变波参数已有成熟的经验公式。根据文献[4]的描述,在满足相当精度条件下,可以设球形药包起爆后引起围岩位移的函数为

$$u_r = u(r, t) = u_p(r)f(t - r/c) \quad (5)$$

这里忽略了物理衰减中的频散效应,并假定岩体是各向同性的。 $u_p(r)$ 表示  $r$  处的质点位移,经验函数为

$$u_p(r) = (b/r)^n \quad (6)$$

式中:  $b$  为炮孔直径;  $n$  为衰减指数。

$f(t)$  是描述质点位移随时间变化的函数。根据 Starfield 的建议<sup>[5]</sup>,取

$$f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ Be^{-\beta t}\sin(\omega t), & 0 \leq t \leq 3\pi/2\omega \\ -Be^{-\beta t}, & t > 3\pi/2\omega \end{cases} \quad (7)$$

这里  $\beta$  和  $\omega$  是常数,  $B$  值为

$$B = \frac{2(1 + \nu)b}{E} \cdot \sigma_{\max}$$

$E, \nu$  为岩体弹性常数,  $\sigma_{\max}$  为炮孔壁最大压力。

在应变波到达瞬间,岩体内每一点附近可视为各向同性线弹性体,该点的体应变为

$$\varepsilon = (\varepsilon_{rr} + 2\varepsilon_{\theta\theta}) = \left(\frac{du_p}{dr} + \frac{2u_p}{r}\right)f(t - r/c) \quad (8)$$

式中:  $c$  为应变波波速;  $r$  为质点到药仓中心距离。体应变率为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = f'(t - \frac{r}{c})\left(\frac{du_p}{dr} + \frac{2u_p}{r}\right) \quad (9)$$

将式(8)、(9)代入式(3)中,就可算出球形装药在岩体中爆炸所产生的损伤值。

### 2.2.2 柱状装药

柱状装药的应变波计算较为复杂,也没有如球形装药那么成熟的经验公式。因此,按 Starfield 和 Puliese 建议的办法<sup>[5]</sup>来解决。将图1的柱状药包分成  $N$  个小药包,每个小药包可视为球状药包,再将  $N$  个小药包在  $A$  点的作用叠加起来,就得到条形药包在  $A$  点的应变波参数。体应变为

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^N \varepsilon_i \quad (10)$$

$\varepsilon_i$  为第  $i$  个小药包在  $A$  点产生的体应变。

将上式对  $t$  求导, 可得  $A$  点的体应变率

$$\dot{\epsilon} = \sum_{i=1}^N \dot{\epsilon}_i \quad (11)$$

将式(8)、(9)代入式(10)、(11), 然后再代入式(3), 即可得到条形装药爆炸应变波对围岩的损伤。当装药长度较长时, 将形成以装药中心线为轴线的等损伤柱面。

### 3 计及损伤作用的爆炸裂纹传播

#### 3.1 有效应力强度因子的引入

围岩产生损伤后, 有

$$\sigma_{ij} = K(1 - D)\epsilon\delta_{ij} + 2G(1 - D)(\epsilon_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}) \quad (4)$$

两边同除以  $(1 - D)$ , 有

$$\frac{\sigma_{ij}}{1 - D} = K\epsilon\delta_{ij} + 2G(\epsilon_{ij} - \frac{1}{3}\delta_{ij}) = \sigma_{ij}^* \quad (12)$$

$\sigma_{ij}^*$  就是有效应力。同样, 定义

$$k^* = k / (1 - D) \quad (13)$$

为有效应力强度因子<sup>[6]</sup>, 式中  $k$  为未计损伤时的应力强度因子。

#### 3.2 断裂模型及过程

一般认为, 岩体爆破成缝的过程是在爆炸冲击波的作用下, 孔壁周围形成密集的初始裂纹网, 然后爆生气体的准静态压力使初始裂纹沿一个或数个方向发展成主裂纹; 爆生气体驱动裂纹继续向前扩展, 直到满足一定条件不能再扩展为止。爆生裂纹的计算模型如图2。取冲击波作用后主裂纹初始长度  $L_0 = 3b$ , 根据文献[2], 此时裂纹尖端的有效应力强度因子为

$$k_1^* = \frac{k_1}{1 - D} = \frac{2}{1 - D} \left[ \frac{L(t) + b}{\pi} \right]^{1/2} \times \int_0^{L(t)+b} \frac{p(x, t) - \sigma}{\{ [L(t) + b]^2 - x^2 \}^{1/2}} dx \quad (14)$$

式中:  $p(x, t)$  为沿裂纹长度方向的气体压力分布;  $\sigma$  为原岩应力;  $D$  为裂纹尖端的损伤值, 可由前述方法求出。  $L(t)$  是裂纹长度, 它等于

$$L(t) = \int_0^t v_r(t) dt \quad (15)$$

$v_r(t)$  为裂纹尖端扩展速度;  $L_1(t)$  是气体贯入裂纹的长度, 它可由下式确定

$$L_1(t) = \int_0^t v_c(t) dt \quad (16)$$

$v_c(t)$  为贯入裂纹中的气体前端流速。

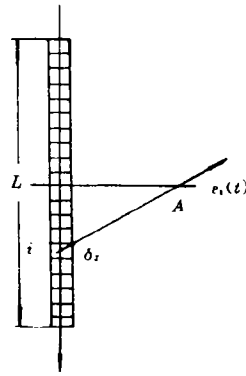


图 1 条形药包应变波计算模型图

Fig. 1 The calculating model of strain waves generated by cylindrical charges

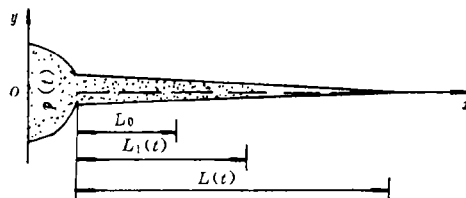


图 2 爆生气体驱动裂纹扩展模型

Fig. 2 The model of crack propagation driven by gases of explosion products

若岩石的止裂韧度为  $k_a$ , 则当

$$k_1^* > k_a \quad (17)$$

时, 裂纹能稳定传播。

若

$$k_1^* \leq k_a \quad (18)$$

则裂纹停止发展。

若

$$\frac{\partial k_1^*}{\partial t} > 0 \quad (19)$$

表明裂纹尖端有效应力强度因子仍在增大, 一旦满足

$$k_1^* = k_{IC} \quad (20)$$

则裂纹将还会再扩展。  $k_{IC}$  为岩石的断裂韧性。

若

$$\frac{\partial k_1^*}{\partial t} \leq 0 \quad (21)$$

则表明裂纹扩展结束, 此时算得的  $L(t)$  即为裂纹的最终长度。

### 3.3 裂纹传播过程的讨论

#### 3.3.1 起裂条件

由于  $k_1^* = \frac{k_1}{1-D} > k_1$ , 因此, 存在以下情况

$$k_1 < k_{IC} < k_1^*$$

此时, 按传统的理论, 将得出裂纹不能起裂的错误结论。事实上, 此时裂纹仍能起裂, 即炮孔内压力可以在比以往理论预测值更低的情况下使裂纹起裂。这也是 Kutter 所称使炮孔压力更有效的表现之一。

#### 3.3.2 止裂条件

当  $k_1 < k_a < k_1^*$  时, 按以往理论, 裂纹应当停止传播; 但事实上, 由于应变波的损伤作用 (即 Kutter 所谓预载荷), 使得裂纹尖端仍能满足传播条件, 裂纹仍在持续稳定传播。即: 损伤使裂纹可在较低的爆生气体压力支持下稳定传播。这也是炮孔压力更有效的表现。

#### 3.3.3 裂纹扩展速度

从上面的讨论可以看出, 裂纹将比在不计损伤时有更长的稳定传播时间, 从而使裂纹总体传播速度得以提高。与此同时, 当炮孔压力还很高时, 裂纹已发展到较远处, 从而有利于充分利用炮孔内压高压段的能源。这也是炮孔内压更有效的表现。

#### 3.3.4 裂纹最终长度

当裂纹发展到最后一次止裂后, 将不再扩展, 设此时炮孔内压力为  $p$ , 不计损伤时最终裂纹长度为  $L$ , 有

$$k_1 = 2 \left[ \frac{L+b}{\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \int_0^{L+b} \frac{p-\sigma}{[(L+b)^2-x^2]^{1/2}} dx = k_a$$

考虑应变波的损伤作用后裂纹长度为  $L'$ , 有

$$k_1^* = \frac{2}{1-D} \left[ \frac{L'+b}{\pi} \right]^{\frac{1}{2}} \int_0^{L'+b} \frac{p-\sigma}{[(L'+b)^2-x^2]^{1/2}} dx = k_a$$

积分并比较两式, 有

$$L' = \frac{L}{(1-D)^2} \quad (22)$$

式中  $D$  为裂纹尖端的损伤值。

上式表明,由于应变波的损伤作用,爆生裂纹的最终长度将比以往理论预测的长。这显然是应变波的贡献,也是炮孔压力更有效的又一表现。

#### 4 结 语

我们试图将爆破作用的两种形态——应变波的动力作用和爆生气体的准静态作用结合起来考虑,以克服现存理论往往强调一方面而忽略另一方面的弊端。我们提供的方法,再辅以文献[2]中计算裂纹扩展和气体流速的方程,就可求解爆生裂纹扩展的全过程。由于考虑了应变波的动力作用,它可望得到更符合实际的结果。

对裂纹的扩展过程的讨论表明,应变波的动力作用——对岩体的损伤,对裂纹的扩展是有贡献的,即使炮孔压力更有效。

分析结果表明:考虑损伤后裂纹的最终长度将比不计损伤时长。这可作光爆和预裂爆破设计时参考。

#### 参 考 文 献

- 1 杨善元. 岩石爆破动力学基础. 北京:煤炭工业出版社,1993,140~160
- 2 卢文波,陶振宇. 爆生气体驱动的裂纹扩展速度研究. 爆炸与冲击,1994,14(3):264~268
- 3 刘殿书. 岩石爆破的数值模拟:[博士学位论文]. 徐州:中国矿业大学档案室,1992
- 4 高金石,张 奇. 爆破理论与爆破优化. 西安:西安地图出版社,1993,182~184
- 5 Starfield A M, Puliese J M. Compression Waves Generated in Rock By Cylindrical Explosive Charges: A Comparison Between a Computer Model and Field Measurements. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science 1968,5(5):65~77
- 6 凌建明,刘尧军. 岩体损伤的断裂效应及其对洞室围岩稳定性的影响. 石家庄铁道学院学报,1994,(3):23~29

## DAMAGE EFFECT IN ROCK BY STRAIN WAVES AND CRACK PROPAGATION BY EXPLOSION

Wang Jialai, Xu Ying

(China University of Mining Technology, Xuzhou, 221008)

**ABSTRACT** A method for calculating the damage generated by strain waves is presented in this paper. In combination with the dynamic effect of strain waves and quasi-static effect of explosion products, the author analyses the whole process of fracture and revises the defect of prevailing theories. The paper also reveals the mechanism of the preliminary loading effect of strain waves proposed by Kutter<sup>[1]</sup>.

**KEY WORDS** damage, strain wave, effective stress intensity factor