

文章编号: 1001-1455(2000)03-0247-06

岩石爆破损伤断裂的细观机理

杨小林¹, 王树仁²

(1. 焦作工学院, 河南 焦作 454100;

2. 中国矿业大学北京校区, 北京 100083)

摘要: 基于现有岩石爆破机理和岩石细观损伤力学, 认为岩石爆破损伤断裂过程包含有爆炸应力波的初期动态损伤演化阶段和后期爆生气体作用下的准静态损伤演化阶段, 并分别建立了这两个阶段的损伤模型和断裂准则, 阐述了岩石爆破损伤断裂的细观理论。

关键词: 岩石爆破; 应力波; 爆生气体; 损伤机理

中图分类号: TD235.1⁺1 文献标识码: A

1 引言

以往采用的经典固体力学方法解释岩石在爆炸载荷作用下的力学行为, 无法揭示岩石爆破破碎的全过程, 也难以确定岩石内的损伤和破坏程度; 而采用细观力学方法则是深入了解岩石内部从损伤到破碎全过程的有效手段。

岩石爆破损伤断裂过程包含有爆炸应力波动作用和爆生气体准静态作用两个阶段, 由于岩石对动态和静态加载的响应差别较大, 因此其损伤断裂机理也有所不同; 而且爆生气体对岩石的损伤断裂作用在爆破近区和中远区又不相同。在爆破近区气体可能要渗入岩石内部裂纹中, 裂纹的扩展以气体驱动下的模式扩展; 而在爆破中远区的微裂纹扩展是在气体膨胀压力场和原岩应力作用下发生的。现有的岩石爆破损伤模型^[1~2]只考虑了应力波作用下的岩石内部由于微裂纹扩展所造成的损伤问题, 显然不能全面合理地反映岩石爆破损伤断裂的实际情况。在现有岩石爆破损伤模型和岩石细观损伤力学的基础上, 我们探讨了岩石在爆炸应力波和爆生气体作用下损伤断裂的基本理论。

2 岩石爆破损伤断裂过程

岩石爆破损伤断裂的细观机理是以岩石爆破机理和岩石细观损伤力学为理论基础的。岩石爆破理论包含两部分内容: 一是爆炸应力波的作用机理; 二是爆生气体的准静态作用机理。尽管基于二者之一发展了不同的岩石爆破机理, 但目前已基本上得到共识, 认为岩石的爆破破坏是二者共同作用的结果, 只是在不同的岩石和装药条件下, 二者的作用程度不同。

根据岩石爆破理论^[3], 炸药在无限大的岩体中爆炸时, 在岩石内部将产生爆炸冲击波作用下的粉碎区(近区)、爆炸应力波和爆生气体作用下的裂隙区(中区)以及爆炸振动波的弹性振动区(远区)。由于在爆破近区, 岩石被强烈压缩破碎, 且作用范围小, 而爆破远区是弹性振动

* 收稿日期: 1999-08-18; 修回日期: 1999-12-31

作者简介: 杨小林(1963—), 博士, 副教授。

区,可不考虑损伤问题,因此我们对岩石的爆破损伤断裂研究的重点是在爆破中区,且为简化而忽略爆破近区,将冲击波的作用区近似为应力波作用的一部分。那么根据岩石的爆炸作用和损伤断裂的细观机理,岩石爆破损伤断裂的过程可分为以下两个阶段:

(1)爆炸应力波作用下岩石的损伤断裂初期,该阶段在爆破近区产生宏观裂纹,在爆破中区使微裂纹激活并扩展;

(2)爆生气体的准静态作用后期,该阶段是在爆炸应力波造成的损伤场基础上,产生二次损伤断裂的过程,在爆破近区为爆生气体驱动下的裂纹扩展区,中远区为爆生气体压力场作用下的微裂纹扩展区。

3 岩石爆破损伤断裂准则

根据以上对岩石爆破损伤过程分析和岩石损伤断裂机理,在爆炸作用的不同阶段需要采用不同的岩石损伤断裂准则。

3.1 爆炸冲击波作用下的宏观裂隙区

在该区,爆炸冲击波的压力载荷远远超过岩石的抗压强度,岩石产生强烈的压缩破坏,因此,可采用岩石的动态抗压强度作为破坏准则。该区域作用范围很小,一般约为装药半径的2~3倍^[3]。

3.2 爆炸应力波作用下的微裂纹区

在爆炸应力波作用下,岩石往往表现为强脆性,因此,在爆炸应力波作用下的岩石损伤断裂准则可以采用纯脆性损伤断裂准则。从 Lemaitre^[4] 等效应力的概念出发,认为当等效应力 σ_e 达到岩石的动态断裂应力 σ_u 时,损伤达临界值,材料发生断裂,从而得到损伤断裂准则的表达式

$$\sigma_e = \sigma / (1 - D_c) = \sigma_u \quad (1)$$

通常情况下,临界损伤 $D_c = 0.2 \sim 0.5$;对于纯脆性损伤: $D_c \approx 0$, $\sigma_e = \sigma = \sigma_u$ 。

3.3 爆生气体驱动下的裂纹扩展区

爆生气体驱动作用下的径向裂纹扩展是一个经典的断裂力学问题,可以采用断裂力学中的应力强度因子作为裂纹扩展准则。若岩石的断裂韧性为 K_{Ic} ,则裂纹扩展的条件为: $K_I = K_{Ic}$ 。

3.4 爆生气体压力场作用下的微裂纹扩展区

由于爆生气体的压力场是一个准静态作用过程,在静态应力作用下,岩石的脆性减弱,此时岩石表现为准脆性。岩石细观损伤力学认为:裂纹的扩展是由于局部塑性变形造成的,因此,爆生气体压力场作用下的损伤断裂准则可采用准脆性材料的微裂纹扩展条件^[5]

$$\sigma = \sigma_c = \sqrt{\pi/4a} K_{Ic} \quad (2)$$

式中: σ 为岩石中的应力; σ_c 为微裂纹发生扩展的临界应力; a 为微裂纹的初始半径; K_{Ic} 为应力强度因子。

当 $\sigma < \sigma_c$ 时,材料处于线弹性无损阶段;当 $\sigma \geq \sigma_c$ 时,初始半径为 a 的微裂纹开始发生扩展,材料进入非线性损伤阶段,此时垂直于拉伸方向的微裂纹将首先穿越晶界,在基质材料中失稳扩展,引起材料内部损伤和变形的局部化。

4 岩石爆破损伤断裂机理

岩石爆破损伤断裂过程就是在爆炸作用下微裂纹的扩展过程,即损伤演化过程。现有的岩石爆破损伤模型主要针对在爆炸应力波作用下的损伤过程做过大量工作^[1~2],而在对爆生气体作用下的损伤断裂过程及其机理尚未进行研究。由于爆炸加载包含有动态和静态载荷两种形式,相应的损伤断裂机理也应有所不同,对应于岩石爆破损伤断裂的两个阶段应有不同的损伤断裂机理。因此提出新的岩石爆破损伤断裂机理如下。

4.1 基本假设

①岩石内的损伤是由于爆炸应力波和爆生气体共同作用下的微裂纹扩展所致,爆炸应力波作用下的损伤是脆性损伤,而爆生气体作用下为准脆性损伤;

②爆生气体压力场作用下没有新的微裂纹被激活和产生;

③爆炸应力波使微裂纹发生了稳态扩展而止裂,爆生气体的二次扩展是由于在已经发生了扩展的微裂纹尖端的损伤局部化的结果。

4.2 岩石在爆炸应力波作用下的损伤模型

根据 Grady 和 Kipp, 裂纹密度就是裂纹影响区的岩石总体积与岩石体积之比,激活的裂纹数服从体积拉伸应变的双参数 Weibull 分布^[1]。

$$C_d = \beta N a^3, \quad N = k \theta^m \quad (3)$$

式中: C_d 为裂纹密度; N 为激活的裂纹数; θ 为体积拉伸应变; k 、 m 为分布参数; β 为系数,可近似取 1; a 是在爆炸应力波作用下的微裂纹平均半径,其表达式为^[1]

$$a = \frac{1}{2} \left[\frac{\sqrt{20K_{Ic}}}{\rho_c \dot{\theta}_{\max}} \right]^{2/3} \quad (4)$$

式中: K_{Ic} 为断裂韧性; ρ 是密度; c 是纵波速度; $\dot{\theta}_{\max}$ 为最大体积拉应变率。

损伤变量 D 由介质的体积模量 K 定义

$$D = 1 - \bar{K}/K \quad (5)$$

根据不考虑微裂纹之间相互作用的 Taylor 方法,得到的有效体积模量 \bar{K} ^[5]

$$\frac{\bar{K}}{K} = \left[1 + \frac{16}{9} \frac{1-\nu^2}{1-2\nu} C_d \right]^{-1} \quad (6)$$

则损伤变量 D 为

$$D = 1 - \left[1 + \frac{16}{9} \frac{1-\nu^2}{1-2\nu} C_d \right]^{-1} = 1 - (1 + AC_d)^{-1} \quad (7)$$

式中: ν 为泊松比; $A = 16(1-\nu^2)/(9(1-2\nu))$ 为常数。

将(3)代入,并取 $\beta=1$ 得

$$D = 1 - (1 + ANa^3)^{-1} = 1 - (1 + Ak\theta^m a^3)^{-1} \quad (8)$$

式(8)即为由 Taylor 模型下得到的损伤变量表达式,将损伤变量和裂纹数 N 及微裂纹半径 a 联系起来,且更适应高裂纹密度的情况。将以上定义的损伤变量耦合到线弹性应力应变关系中去,得体积拉伸状态下的岩石动态本构关系

$$\begin{cases} P = 3K(1-D)\theta \\ S_{ij} = 2G(1-D)e_{ij} \end{cases} \quad (9)$$

式中： P 为体应力； θ 为体应变； S_{ij} 为偏应力； e_{ij} 为应变偏量； G 为剪切模量。

式(3)、(4)与式(8)、(9)联立即构成岩石爆破细观损伤模型。体积压缩部分的岩石本构关系可由经典的弹塑性模型来描述。

4.3 岩石在爆生气体作用下的裂纹扩展

4.3.1 气体驱动下的宏观裂纹扩展

(1) 裂纹中的气体流动规律

假设爆生气体在每条裂纹中的流动规律一样，那么可只考虑裂纹间的平均效应；并假设裂纹内紊流密度的变化、流体的紊流强度和 Mach 数都较小、且气体的膨胀过程为绝热膨胀过程；则由问题的对称性，平面楔形裂纹的动态扩展模型如图 1 所示。根据 Nillson 模型^[6]，在该模型裂纹中的一维流动控制方程

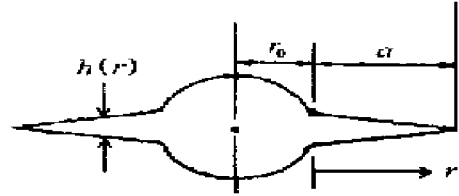


图 1 平面楔形裂纹的动态扩展模型
Fig. 1 Planar model with wedge-shaped fractures

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v h)}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial p}{\partial r} + \rho v^2 \Psi = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中： p 、 v 和 ρ 分别为爆生气体的压力、运动速度和密度；摩擦因数 Ψ 取决于雷诺数 Re 和裂纹面的相对粗糙度

$$\Psi = \frac{12}{Re} + 0.1 \sqrt{\frac{\epsilon}{h}} \quad (11)$$

式中： ϵ 为裂纹内壁的绝对粗糙度； h 为裂纹张开位移， $h = h(r)$ 。

(2) 气体的状态方程

$$p = A \rho^\gamma \quad (12)$$

式中： γ 为绝热指数，当 $p \geq p_c$ (炸药的临界压力，可取 200MPa) 时， $\gamma=3$ ；当 $p < p_c$ 时，取 $\gamma=1$ 。

(3) 裂纹的张开位移

假设爆生气体完全充满楔形裂纹，且裂纹尖端的非弹性区与裂纹长度相比很小，则由线弹性断裂力学理论可得图 1 中两条对称分布的裂纹张开位移

$$h(r) = \frac{4(1-\nu)}{\pi G} \int_r^a \int_0^\xi \frac{(p(\zeta) - \sigma_\infty)}{\sqrt{\xi^2 - \zeta^2}} d\zeta \frac{\xi}{\sqrt{\xi^2 - r^2}} d\xi \quad (13)$$

对于裂纹数 $N > 2$ 的情况，裂纹张开位移要乘以一个小于 1 的系数 f ，其定义为^[6]

$$f = \frac{(1 + Na/(\pi r_0)) f_\infty}{(f_\infty + Na/(\pi r_0))}, \quad f_\infty = (1 + \frac{\pi}{4}) \frac{\sqrt{N-1}}{N} \quad (14)$$

式中： a 为裂纹长度； $p(r)$ 为裂纹内的压力分布； σ_∞ 为远场应力； r_0 为炮孔半径。

(4) 裂纹扩展的条件

在内压和远场压应力作用下，图 1 模型中裂纹尖端的应力强度因子 K_I 为

$$K_I = 2f \sqrt{\frac{a}{\pi}} \int_0^a \frac{p(r) - \sigma_\infty}{\sqrt{a^2 - r^2}} dr \quad (15)$$

若岩石的断裂韧性为 K_{Ic} , 则裂纹的稳态扩展条件为

$$K_I = K_{Ic} \quad (16)$$

止裂条件为

$$K_I < K_{Ic}, \partial K_I / \partial t \leq 0 \quad (17)$$

式(10)~(13)和式(15)构成了可计算裂纹扩展的几何尺寸、扩展速度和气体压力的封闭方程组。

4.3.2 压力场作用下微裂纹扩展

爆破中区在爆炸应力波作用下产生大量随机分布的微裂纹, 这些微裂纹在爆生气体压力作用下要产生二次扩展。由于微裂纹的扩展是在拉应力的作用下发生的, 而在压应力下不考虑其扩展问题, 因此, 在爆破中区的微裂纹扩展只在一定范围内发生, 该范围的尺寸取决于爆生气体的压力、远场应力、岩石性质及裂纹尺寸等。

由于垂直于环向拉应力方向的微裂纹首先扩展, 则爆生气体压力场作用下微裂纹二次扩展问题, 可采用文献[5]中单个微裂纹在受到远场拉应力作用下的损伤局部化问题来研究。

假设爆炸应力波作用后微裂纹产生扩展并具有统计平均半径 a_u , 当微裂纹满足拉伸条件下的二次扩展准则式(2)时, 则微裂纹发生二次失稳扩展, 并引起岩石内部损伤和变形局部化。

爆生气体产生的最大拉应力为环向应力 σ_θ , 其表达式为^[7]

$$\sigma_\theta = \frac{a_g}{r^2} (r_0 p_0 + \int_{r_0}^{a_g} p(y) dy) - \sigma_\infty (1 + \frac{a_g^2}{r^2}) \quad (18)$$

式中: a_g 为爆生气体驱动下孔壁附近的宏观裂纹长度。

假设爆生气体在炮孔及其附近裂纹内压力为常数, 并有 $p(y) = p_0$, 则由式(18)可得到距孔中心为 r 处的环向应力分布为

$$\sigma_\theta = \frac{a_g^2}{r^2} p_0 - \sigma_\infty (1 + \frac{a_g^2}{r^2}) \quad (19)$$

将上式代入微裂纹二次扩展准则式(2), 可求得微裂纹能够发生二次扩展的区域为

$$r_2 = \sqrt{(p_0 - \sigma_\infty) / (\sigma_c + \sigma_\infty)} a_g \quad (20)$$

在该区域内, 微裂纹将在爆生气体压力场作用下发生二次失稳扩展, 同时产生损伤局部化带, 微裂纹尖端的损伤局部化长度^[5]

$$l = b [1 - \cos(\pi \sigma_\theta / (2 \sigma_0))] \quad (21)$$

式中: $b = l + a$ 。因此, 爆生气体产生的损伤断裂区范围可由式(20)确定; 在该范围以外, 岩石将不会再产生损伤, 而只发生弹性卸载。

5 结论——岩石内的爆破损伤场

根据以上分析, 可以确定岩石在爆炸载荷作用下的损伤场。

(1)在爆破近区, 在爆炸冲击波作用下岩石内部产生宏观裂纹, 裂纹在爆生气体流体压力驱动下进一步扩展, 裂纹扩展的边界即为宏观裂纹的结束; 止裂条件由式(17)给出。在宏观裂纹区, 岩石被认为已完全损伤, 损伤值 $D = 1$ 。

(2)在爆破中区, 岩石在爆炸应力波作用下, 微裂纹被激活和扩展, 从而使岩石产生损伤, 损伤场由式(8)给出, 微裂纹在爆炸应力波作用下的扩展半径可由式(4)确定, 它是爆生气体作用下裂纹扩展的初始值。

(3) 爆破中区在爆生气体作用下的损伤场, 可根据以下步骤确定。

① 由式(20)的扩展条件可确定在爆生气体作用下具有统计半径为 a 的微裂纹扩展区域, 该区域决定了爆破中区微裂纹发生二次扩展的范围;

② 在扩展范围内, 微裂纹发生损伤局部化, 爆生气体作用后的裂纹长度由 a 增加至 b ;

③ 将 b 代替 a 代入式(8)的损伤变量定义式, 可确定岩石在爆炸载荷作用下的损伤场; 爆破中区的损伤值为 $0 \leq D \leq 1$ 。

(4) 在爆破远区, 岩石只发生弹性振动, 不发生损伤, 即 $D=0$ 。

以上计算构成了岩石在爆炸应力波和爆生气体作用下的损伤演化全过程理论。由于采用了非相互作用的 Taylor 模型确定损伤变量, 因此, 使得该过程可以分阶段来计算岩石爆破的损伤演化, 且易于实现该过程的数值模拟, 数值模拟的方法和结果将另文介绍。

岩石爆破机理的研究是一个十分复杂而困难的课题, 本文只是在该方面采用岩石细观损伤力学的观点进行了初步尝试, 供同行商榷。

参考文献:

- [1] Grady D E, Kipp M L. Continuum Modelling of Explosive Fracture in Oil Shale [J]. Int J Rock Mech Sci & Geomech Abstr, 1987, 17: 147—157.
- [2] Thome B J, Hommert P J, Brown B. Experimental and Computational Investigation of the Fundamental Mechanisms of Crating [A]. Proc 3rd Int Symp on Rock Frag [C]. Blasting, Brisbane: [s. n.], 1990. 117—124.
- [3] 钮 强. 岩石爆破机理 [M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1990.
- [4] Lemaitre J. 损伤力学教程(中译本) [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [5] 余寿文, 冯西桥. 损伤力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.
- [6] Nilson R H. Modelling of Gas-Driven Fractures Induced by Propellant Combustion Within a Borehole [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1985, 22(1): 3—19.
- [7] Paine A S, Please C P. An Improved Model of Fracture Propagation by Gas During Rock Blasting—Some Analytical Results [J]. Int J Rock Mech Min Sci, 1994, 31(6): 699—706.

Meso-Mechanism of Damage and Fracture on Rock Blasting

YANG Xiao-lin¹, WANG Shu-ren²

(1. Jiaozuo Institute of Technology, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. Chain University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on existing rock blasting mechanism and rock meso-damage mechanism, the process of rock blasting damage is presented, which includes both the initial dynamic involution stage during the stress wave and the final static stage during detonation gases. The damage models and the fracture criterion of these two stages are established individually. The theory of damage and the meso-mechanism of fracture on rock blasting is analyzed.

Key words: rock blasting; explosive stress wave; detonation gases; damage mechanism