

岩石爆破破岩机理的损伤力学分析

王家来

刘积铭

(同济大学 上海 200092)

(淮南矿业学院 淮南 232001)

提要 岩石爆破破碎过程可分为冲击波及其产生的应力(应变)波的动作用和爆生气体的静压力作用两个阶段。由于岩石的不均质性,动作用将使岩石内部形成损伤,静作用阶段则在此基础上,使岩石碎化。本文引入损伤因子 D 来描述动作用的效果,使动静态两个阶段的力学描述得以统一,进一步揭示岩石爆破的力学本质。

关键词 破岩机理, 损伤因子, 断裂耗散能

1 前言

岩石爆破破碎机理一直是众多学者关注的问题,近几十年来,经过长期的生产实践,人们逐步加深了对这个问题的认识和理解,并提出了种种假说。比较有代表性的有3种,即:爆生气体膨胀推力理论,应力波反射破坏理论和气体膨胀推力与冲击波所引起的应力波共同作用理论。前两种理论只强调爆破作用过程的一个方面,因而有失偏颇。后一种理论兼顾了爆破过程的动静态作用,比较切合实际,因而目前为人们所普遍接受。但传统的分析方法总是对这两种作用作单独分析,割裂了这两个过程的内在联系。本文则想通过引入损伤因子 D 来描述爆破动作用的效果,以实现动静态作用过程的耦合,进一步揭示岩石爆破的力学本质。

2 岩石爆破的两个阶段

炸药在炮孔内起爆后,高温高压气体迅速冲击孔壁。当炸药爆轰速度超过孔壁岩石的纵波速度时,将在其内产生冲击波;如果小于纵波速度,则在孔壁上产生应力脉冲。冲击波、应力脉冲以后均衰减为应力波并继续向外传播。而高温高压气体在冲击孔壁后,炸药爆炸的能量并没有完全消失。一般估计仍有约50%左右的能量保留在爆生气体之中,它以较低的压力(约几百个大气压)继续作用在孔壁上。

对露天矿爆破的高速摄影表明^[1]:一般作用下(负载值为6—8m时),炸药起爆后台阶面的胀裂、抛掷时间在20—30ms之后,而冲击波的作用时间很短,一般不超过5—6ms,剩下的较长时间内为爆生气体的准静态作用时间。事实上,文献[2]中指出,爆生气体还可以在负载岩石中形成准静态应力场。因此,人们认为岩石爆破过程可以分为两个相继的阶段,即先是冲击波、应力(应变)波的动作用阶段,然后为爆生气体的准静态作用阶段。

1996年2月27日收到初稿。

3 动作用阶段对岩石的损伤

应力波动作用在岩石中将形成密集的裂纹网。动光弹高速摄影发现这些裂纹的起点经常在介质中的微裂纹处，而不是传统理论所认为的起于炮孔壁，这表明传统的应力波成缝理论与实际有出入^[3]。进入 80 年代，随着动态损伤力学的发展^[4]，人们对应力波作用下材料的破坏力学机制有了更近实际的认识。

事实上，在实际岩石内部，充满了各种不同尺寸的原生裂纹，其长度和方位在空间上随机分布。当承载时，一些裂纹将被激活并扩展。在一定强度的应变波的作用下，所激活的裂纹数服从指数分布^[4]：

$$N(\varepsilon) = A e^m \tag{1}$$

式中： $N(\varepsilon)$ 是被激活的裂纹数， ε 是体积应变， A 、 m 是无量纲的材料常数。设裂纹的扩展速度为常数 C_p ，借用 Walsh (1965 年) 的近似关系，定义 t 时刻的损伤为：

$$D(t) = \int_0^t \xi(t, \tau) d\tau \tag{2}$$

其中：

$$\xi(t, \tau) = \frac{4\pi}{3} A m C_p^3 e^{m-1}(\tau) \dot{\varepsilon}(\tau) [1 - D(\tau)] (t - \tau)^3 \tag{3}$$

损伤后岩体的应力应变关系为：

$$\sigma_{ij} = K(1 - D)\varepsilon_m \delta_{ij} + 2G(1 - D) \left(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_m \delta_{ij} \right) \tag{4}$$

式中 K 、 G 是体积模量和剪切模量两个弹性常数。

根据相似分析和分离变量法，距爆源为 r 球面波的位移为：

$$u_r = u(r, t) = u_r(r) f(t - r/C_p) \tag{5}$$

式中 C_p 为岩体的波速。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。其中：

$$u_r(r) = (r/b)^{-n} \tag{6}$$

式中 b 为炮孔直径， n 为衰减指数。

$$f(t) = 2(1 + \mu) b p(t) / E \tag{7}$$

式中 μ 为岩石的泊松比， E 为弹性模量。 $P(t)$ 为炮孔孔壁的压力，按下式计算：

$$p(t) = 4P_m [\exp(-\omega t / \sqrt{2}) - \exp(-\sqrt{2} \omega t)] \tag{8}$$

ω 为波形参数， P_m 为孔壁的峰压。

在应变波到达的瞬间，岩体内的每一点都可以看作各向同性弹性体，该点的体积应变为

$$\begin{aligned} \varepsilon &= (\varepsilon_{rr} + 2\varepsilon_{\theta\theta}) \\ &= \left(\frac{du_r}{dr} + \frac{2u_r}{r} \right) f(t - r/C_p) - \frac{u_r}{C_p} f'(t - r/C_p) \end{aligned} \tag{9}$$

则体积应变率为

$$\dot{\epsilon} = \left(\frac{du_p}{dr} + \frac{2u_p}{r} \right) f'(t - r/C_p) - \frac{u_p}{C_p} f''(t - r/C_p) \quad (10)$$

根据以上几式就可以算出爆炸动作用对岩体的损伤。以上的计算是针对球形装药而言的。如果是柱状装药，则将其划分为若干个等效球形药包，然后再将每个等效药包的作用效果迭加，得到损伤值。

4 静作用阶段对岩石的影响

动作用阶段使岩体受到损伤，使其内部充满裂纹，即所谓“震裂”；而随后作用的爆生气体的准静态压力将使“震裂”的岩石内的裂纹扩展，实现岩石的碎化。

岩石的三点弯曲试验表明^[5]：静压作用下，岩体内必须储有足够的能量，裂纹才有可能稳定发展，同时耗散能量 G_f 。 G_f 称为岩石的断裂损伤耗散能。显然，它表征了岩石抵抗破碎的能力。在爆破的静作用阶段，爆生气体的准静态压力实现岩体碎化的力学本质就是向岩体提供足够的能量，以克服 G_f 。 G_f 的值可由实验获得(图 1)，由图可以获得其计算式如下：

$$G_f = \frac{1}{2} \frac{\sigma_c^2}{E} + \int_{\epsilon_c}^{\epsilon_f} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (11)$$

由于岩体已受应变波的作用而发生损伤，因而由式(4)可得：

$$\begin{aligned} E' &= (1 - D)E \\ \sigma_c' &= (1 - D)\sigma_c \\ \sigma' &= (1 - D)\sigma \end{aligned} \quad (12)$$

从而有：

$$G_f' = (1 - D)G_f \quad (13)$$

该式给出了动静作用两个过程在岩石爆破过程中所起的作用：一方面，冲击波和应力波的动作用使岩石受到损伤，在岩石内部形成许多裂纹，即传统爆破理论所说的“震裂”。在力学效果上，该阶段使得岩石的断裂耗散能下降了 DG_f ，从而削弱了岩石的“抗爆性”，即 Kutter 等所认为的对岩石起到预加工的作用^[2]。另一方面，爆生气体的静作用阶段在岩体内形成的准静应力场为克服岩石剩下的断裂耗散能 $(1 - D)G_f$ 提供了能源，实现岩石破碎。

在高猛炸药爆破和坚硬、完整性较好的岩石爆破过程中，由于应力波的动作用较强或其衰减较慢，对岩石造成的损伤较大，从而表现出动作用为主。而不耦合装药爆破和松散岩体爆破的情况正相反，应力波的强度较低或其衰减较快，因而对岩体的损伤作用较弱，表现出静作用为主。

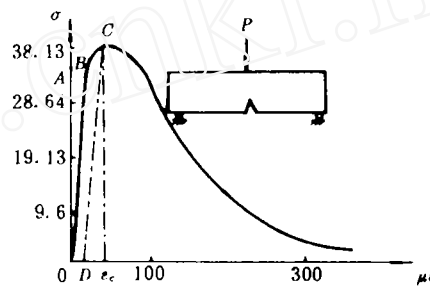


图 1 大理石三点弯曲实验曲线
Fig. 1 Experiment curve of 3 point bending for marble

5 结论

岩石爆破过程可以分为相继的两个作用阶段,即冲击波和应力(应变)波的动力作用阶段和爆生气体的准静态作用阶段。在动力作用阶段,应力(应变)波对岩体造成损伤,克服了部分岩石断裂耗散能,对岩体做了“预加工”。在静作用阶段,爆生气体的准静态压力为克服岩石剩下的断裂耗散能提供了能源,实现岩石破碎。

参 考 文 献

- 1 潘井澜: 爆破破岩机理的探讨. 爆破, 1994, (4): 1—6
- 2 Kutter K. K., Fairhurst C.: On the fracture process in blasting. *Int. J. of Rock Mech. & Min. Sci.*, 1971, (5): 56—77
- 3 王家来等: 应变波对岩体的损伤作用和爆生裂纹的传播. 爆炸与冲击, 1995, (3): 212—216
- 4 黄筑平等: 材料的动态损伤和失效. 力学进展, 1993, (4): 433—467
- 5 Xie H.: *Fractals in rock mechanics*. Rotterdam: Balkema publishers, 1994

DAMAGE ANALYSIS ON ROCK BLASTING MECHANISM

Wang Jialai

Liu Jiming

(*Tongji University Shanghai, 200092*) (*Huainan Mining Institute, Huainan 232001*)

Abstract Rock blasting process is composed of two consecutive stages, i. e., the dynamic stage caused by the shock wave and stress (strain) wave and the static stage caused by explosion products. Due to the original flaws in rock, the dynamic stage damages the rock, while the static stage breaks the damaged rock into fragments. A parameter d is introduced to evaluate the result of dynamic stage in this paper, as a result, the dynamic and static stages effects on rock breaking are coupled to reveal the mechanism of rock blasting.

Key words blasting mechanism, damage factor, dissipation energy