

# 柱形装药在岩体内的爆炸作用过程<sup>①</sup>

张 奇

(西安矿业学院)

## 摘 要

针对柱形装药在岩体内的爆炸作用过程,通过力学模型和数值计算,获得了柱形装药在岩体内产生的最大爆炸空腔体积及爆炸做功系数,并探讨了有关爆炸参量随时间变化的规律。分析表明:2号岩石铵梯炸药在石灰岩中产生的最大爆炸空腔半径是炮孔半径的1.5倍,爆炸做功系数为0.69;在辉绿岩中产生的最大爆炸空腔半径是炮孔半径的1.26倍,爆炸做功系数为0.54。

**关键词:** 岩石爆破 爆炸空腔 爆炸作用

工程爆破中广泛采用的柱形装药与岩石的相互作用是比较复杂的,它是岩石爆破机理的主要部分,也是炸药与岩石匹配关系的重要研究课题<sup>[1]</sup>。对此,工程爆破学家虽曾提出过爆破空腔理论<sup>[2]</sup>,但并不十分成熟。本文将从理论上讨论这一问题,即通过力学模型和数值计算,研究柱形装药在岩体爆破中的作用过程。在讨论中假设:(1)柱形装药处于无限岩体介质内;(2)柱形装药为轴对称起爆;(3)偶合装药。

## 1 爆炸作用模型

### 1.1 孔壁爆炸作用的初始参数

以装药爆炸瞬间作为爆破作用过程的初始时刻,将相应的爆炸作用参数称为初始参数。

工业炸药的冲击阻抗往往小于岩石介质的冲击阻抗,故装药爆炸瞬间将在岩体内形成一冲击波,并以冲击波的形式反射回爆炸产物。此时孔壁的冲击波压力(即初始孔壁压力) $p_x$ 大于爆轰波的C—J压力 $p_H$ 。反射波传过后使得

爆炸产物的质点速度由 $u_H$ 降低为孔壁的运动速度 $u_x$ 。设爆轰波向孔壁垂直入射,则据爆轰波的基本关系<sup>[3]</sup>有

$$u_x = \frac{D}{\gamma + 1} \left[ 1 + \frac{(\bar{p} - 1)\sqrt{2\gamma}}{\sqrt{(\gamma + 1)\bar{p} + (\gamma - 1)}} \right] \quad (1)$$

式中  $p = p_x / p_H$ ;  $D$  是爆速;  $\gamma$  是爆炸产物的等熵指数。对于岩体内的冲击波,由动量守恒和质量守恒可得

$$u_x = \sqrt{P_x (\rho_{ro}^{-1} - \rho_{rx}^{-1})} \quad (2)$$

式中  $\rho_{ro}$  和  $\rho_{rx}$  分别是岩石的初始密度和波阵面上的密度。岩石在爆炸载荷作用下的状态方程为<sup>[4]</sup>

$$p_x = B(\bar{i}_{rx}^{-4} - 1) \quad (3)$$

式中  $B = 1 / 4c_o^2 \rho_{ro}$ ;  $c_o$  为岩石介质内的纵波速度;  $\rho_{rx}$  是压缩比,  $\bar{i}_{rx} = \rho_{rx} / \rho_{ro}$ 。联解(1)、(2)、(3)式即可求出  $p_x$ 、 $u_x$  和  $\bar{i}_{rx}$ ; 进而由岩体内的冲击波质量守恒关系得

$$c_p \rho_{ro} = (C_p - u_x) \rho_{rx} \quad (4)$$

式中  $c_p$  是冲击波波速。由(3)式求出孔壁处的冲击波速度,亦即  $\rho_{rx} = \rho_{ro}(P_x / B + 1)^{1/4}$

将上式代入(2)式再得

<sup>①</sup>于1992年4月13日收到修正稿

$$u_x = \sqrt{\frac{p_x}{\rho_{ro}}} [1 - (p_x / B + 1)^{-0.25}] \quad (5)$$

联解(1)、(5)式求出  $p_x$ 。然后由(5)式得到  $u_x$ ，由(3)式得到  $i_{rx}$ ，由(4)式得到  $C_p$ 。

## 1.2 孔壁膨胀过程中的参数

孔壁获得爆炸初始参数以后开始膨胀运动，由于孔壁变形，有一稀疏波传入爆轰产物。在孔壁变形过程中，设某一时刻爆生气体压力为  $p_1(t)$ ，其中  $t$  是由初始时刻算起的时间。爆生气体的等熵方程为

$$p_1(t) = A \rho_1^\gamma \quad (6)$$

式中  $A$  为常数。由(6)式推出

$$p_1(t) = p_x(t - \Delta t) \left[ \frac{R(t - \Delta t)}{R(t)} \right]^{2\gamma} \quad (7)$$

式中  $\Delta t$  是时间增量； $R(t - \Delta t)$  和  $R(t)$  分别为  $(t - \Delta t)$  时刻和  $t$  时刻的爆炸空腔半径。如果  $\Delta t$  足够地小，则  $t$  时刻的气体膨胀速度  $u_1(t)$  可被视为  $(t - \Delta t)$  时刻的孔壁变形速度  $u_x(t - \Delta t)$ 。在  $t$  时刻，由于孔壁变形，有一稀疏波传入爆生气体，使爆生气体的膨胀速度  $u_1(t)$  迅速增大到孔壁的变形速度  $u_x(t)$ ，而爆生气体的压力也相应地由  $p_1(t)$  变为  $p_x(t)$ ，因此在孔壁变形过程中，对于爆生气体有

$$u_x(t) = u_1(t) + \int_{p_1(t)}^{p_x(t)} \frac{dp}{\rho c} \quad (8)$$

式中  $c$  是爆生气体内的声速，可由下式确定

$$c = \sqrt{dp/d\rho}$$

由上式和爆生气体的等熵方程可得

$$c/c_1 = (\rho/\rho_1)^{(\gamma-1)/2}$$

$$\rho/\rho_1 = (p/p_1)^{1/\gamma}$$

$$c_1^2 = \gamma p_1 / \rho_1$$

将上三式整理后得

$$c_1(t) = c_1(t - \Delta t) [p_x(t - \Delta t) / p_1(t)]^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}$$

式中  $c_1(t)$  是  $t$  时刻爆生气体的声速； $c_1(t - \Delta t)$  是  $t - \Delta t$  时刻爆生气体的声速。

将上述四式代入(8)式可得

$$u_x(t) = u_1(t) + \frac{2c_1(t)}{\gamma-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_x(t)}{p_1(t)} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] \quad (9)$$

在岩体内爆炸冲击波的波阵面上有

$$\text{动量守恒 } p_2(t) = \rho_{ro} c_p u_2$$

$$\text{质量守恒 } (c_p - u_2) \rho_r = c_p \rho_{ro}$$

$$\text{状态方程 } p_2(t) = B(i_r - 1)$$

式中  $p_2(t)$  是岩体内爆炸冲击波阵面上的压力； $u_2$  是波阵面上的质点速度； $i_r = \rho_r / \rho_{ro}$ ， $\rho_{ro}$ 、 $\rho_r$  分别为波阵面前、后的岩石密度。由上三式可得

$$u_2^2(t) = \frac{p_2(t)}{\rho_{ro}} \left[ 1 - \left( \frac{p_2(t)}{B} + 1 \right)^{-0.25} \right] \quad (10)$$

岩体内爆炸冲击波波阵面后的连续方程为

$$\frac{\partial \rho_r}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_r u_2)}{\partial r} + \frac{\rho_r u_2}{r} = 0$$

式中  $r$  是冲击波半径（波阵面的传播距离）。波阵面后的介质可视为不可压缩<sup>[5]</sup>，即  $\rho_r$  常数。故上式积分后得

$$u_2(t) = u_x(t) R(t) / r \quad (11)$$

式中  $R(t)$  为瞬时爆炸空腔半径。在爆炸载荷作用下，孔壁周围发生粉碎或径向断裂，再考虑到波阵面后介质为不可压缩，可以得到

$$p_2(t) = p_x(t) \frac{R(t)}{r} \quad (12)$$

式中  $p_x(t)$  是  $t$  时刻的孔壁压力。爆炸空腔半径  $R(t)$  和冲击波半径  $r$  采用数值积分为

$$R(t) \approx R_0 + \sum_{i=1}^N \Delta t \cdot u_x(t_i) \quad (N = t / \Delta t)$$

$$r \approx R_0 + \sum_{i=1}^N \Delta t \cdot C_p \quad (N = t / \Delta t)$$

式中  $R_0$  是炮孔初始半径（或者装药半径）

因此由(9)~(12)式联立可以获得  $t$  时刻的孔壁压力、孔壁变形速度等参量随时间的变化规律。

## 1.3 爆炸做功系数

单位长度柱形装药的能量为

$$E = \pi R_0^2 \rho_0 Q \quad (13)$$

式中  $R_0$  为装药半径； $\rho_0$  为装药密度； $Q$  为装药爆热。

装药（单位长度）爆炸对岩石的作功总量为

$$E_1 = 2\pi \int_{R_0}^{R_{max}} R(t) p_x(t) dR$$

式中  $R_{max}$  是最大爆炸空腔半径。因  $dR =$

$u_x(t)dt$  故上式变为( $t_{max}$  是与  $R_{max}$  相对应的时  
间)

$$E_1 = 2\pi \int_0^{t_{max}} R(t) p_x(t) u_x(t) dt \quad (14)$$

根据爆炸做功系数的定义,由(13)、(14)式得

$$\eta = \frac{2 \int_0^{t_{max}} R(t) p_x(t) u_x(t) dt}{R_o^2 \rho_o Q}$$

令  $\bar{R} = R(t) / R_o$ ;  $\bar{t} = t / (R_o / c_o)$  则上式变为

$$\eta = \frac{2 \int_0^{\bar{t}_{max}} \bar{R}(\bar{t}) P_x(\bar{t}) u_x(\bar{t}) d\bar{t}}{\rho_o Q C_o} \quad (15)$$

由(15)式不难看出爆炸做功系数与装药半  
径无关。

## 2 数值方法与结果

### 2.1 计算方法

爆生气体的等熵指数  $\gamma$  是压力  $P_1(t)$  的函  
数,按下列条件取值:

$p_1(t) > 200 \text{ MPa}$  时取  $\gamma = 3$

$p_1(t) \leq 200 \text{ MPa}$  时取  $\gamma = 1.4$

爆炸空腔半径和冲击波半径经无量纲化处  
理后得

$$\bar{R}(\bar{t}) = 1 + \frac{1}{C_o} \sum_{i=1}^N \bar{\Delta t} u_x(\bar{t})$$

$$\bar{r} = 1 + \frac{1}{C_o} \sum_{i=1}^N \bar{\Delta t} c_p$$

式中  $\bar{R}(\bar{t}) = R(t) / R_o$ ;  $\bar{r} = r / R_o$

(15) 式变为

$$\eta = \frac{2 \sum_{i=1}^N \bar{R}(\bar{t}) u_x(\bar{t}) p_x(\bar{t}) \bar{\Delta t}}{\rho_o Q C_o}$$

计算时,首先算出孔壁作用初始参数,然  
后由时间步长逐次迭代,算出孔壁爆炸作用参  
数和爆炸做功系数随时间的变化规律。

### 2.2 计算结果

选用两种有代表性的炸药:(1) 2 号岩石  
铵梯炸药,其  $\rho_o = 1\,000 \text{ kg/m}^3$ ,  $D = 3\,600 \text{ m/s}$ ,  $Q = 3\,761\,870 \text{ J/kg}$ ; (2) 安尼梯炸

药,其  $\rho_o = 1\,000 \text{ kg/m}^3$ ,  $D = 4\,500 \text{ m/s}$ ,  $Q = 4\,435\,676 \text{ J/kg}$ 。

选用两种有代表性的岩石:(1) 石灰岩,  
 $\rho_{ro} = 2\,420 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_o = 3\,430 \text{ m/s}$ ; (2) 辉  
绿岩,其  $\rho_{ro} = 2\,870 \text{ kg/m}^3$ ,  $c_o = 6\,340 \text{ m/s}$ 。计算时间步长  $\Delta t = 0.2 R_o / c_o$ 。计算结  
果如表 1-4。

表 1 2 号岩石铵梯炸药对石灰岩的作用参量

| $t / (2R_o / C_o)$ | $P_x / \text{MPa}$ | $u_x / \text{ms}^{-1}$ | $\bar{R}$ | $\eta$ |
|--------------------|--------------------|------------------------|-----------|--------|
| 0                  | 4911               | 500                    | 1.00      | 0.00   |
| 1                  | 2130               | 242                    | 1.20      | 0.41   |
| 2                  | 1623               | 154                    | 1.31      | 0.54   |
| 3                  | 1101               | 1137                   | 1.39      | 0.61   |
| 4                  | 876                | 100                    | 1.45      | 0.63   |
| 5                  | 613                | 73                     | 1.50      | 0.69   |

表 2 2 号岩石铵梯炸药对辉绿岩的作用参量

| $t / (2R_o / C_o)$ | $P_x / \text{MPa}$ | $u_x / \text{ms}^{-1}$ | $\bar{R}$ | $\eta$ |
|--------------------|--------------------|------------------------|-----------|--------|
| 0                  | 5900               | 306                    | 1.00      | 0.00   |
| 1                  | 4063               | 216                    | 1.08      | 0.23   |
| 2                  | 3070               | 165                    | 1.14      | 0.35   |
| 3                  | 2469               | 133                    | 1.19      | 0.44   |
| 4                  | 2067               | 112                    | 1.23      | 0.49   |
| 5                  | 1780               | 98                     | 1.26      | 0.54   |

表 3 安尼梯炸药对石灰岩的作用参量

| $t / (2R_o / C_o)$ | $P_x / \text{MPa}$ | $u_x / \text{ms}^{-1}$ | $\bar{R}$ | $\eta$ |
|--------------------|--------------------|------------------------|-----------|--------|
| 0                  | 7257               | 695                    | 1.00      | 0.00   |
| 1                  | 2545               | 287                    | 1.25      | 0.62   |
| 2                  | 1477               | 174                    | 1.38      | 0.78   |
| 3                  | 1045               | 126                    | 1.47      | 0.85   |
| 4                  | 812                | 99                     | 1.54      | 0.89   |
| 5                  | 666                | 83                     | 1.59      | 0.92   |

表 4 安尼梯炸药对辉绿岩的作用参量

| $t / (2R_o / C_o)$ | $P_x / \text{MPa}$ | $u_x / \text{ms}^{-1}$ | $\bar{R}$ | $\eta$ |
|--------------------|--------------------|------------------------|-----------|--------|
| 0                  | 8802               | 445                    | 1.00      | 0.00   |
| 1                  | 5343               | 282                    | 1.11      | 0.38   |
| 2                  | 3779               | 203                    | 1.19      | 0.56   |
| 3                  | 2927               | 195                    | 1.24      | 0.67   |
| 4                  | 2393               | 131                    | 1.29      | 0.74   |
| 5                  | 2027               | 112                    | 1.32      | 0.79   |
| 6                  | 1761               | 97                     | 1.36      | 0.82   |

## 3 最大爆炸空腔的判断准则

因岩体内爆炸冲击波(或应力波)波阵面  
后的介质为不可压缩,因此当冲击波(或应力

波) 波阵面上的压力  $p_2$  小于岩石的动抗压强度( $\sigma_c$ ) 时, 孔壁仅发生弹性膨胀, 此时

$$p_2 = \sigma_c$$

对应的空腔半径为最大有效空腔半径, 此时对应的爆炸能量对岩石的有效做功也达到最大。当加载速率为  $10 \sim 10^3$  MPa/s 时, 岩石动抗压强度与静抗压强度相比, 提高 1.16~1.43 倍<sup>[6]</sup>, 即

$$\sigma_c = (1.16 \sim 1.14)[\sigma_c]$$

式中  $[\sigma_c]$  是岩石的静态单轴抗压强度, 载荷速率高时取大值, 软岩取大值。石灰岩的  $[\sigma_c] = 45$  MPa; 辉绿岩的  $[\sigma_c] = 158$  MPa。石灰岩按  $\sigma_c = 1.43[\sigma_c]$ 、辉绿岩按  $\sigma_c = 1.16[\sigma_c]$  计算, 由计算程序可得到表 5, 表中  $\eta_{\max}$  表示最大爆炸做功系数。

表 5  $R_{\max}$  和  $\eta_{\max}$  的计算结果

| 炸药-岩石匹配       | $R_{\max}$ | $\eta_{\max}$ |
|---------------|------------|---------------|
| 2 号岩石铵梯炸药-石灰岩 | 1.50       | 0.69          |
| 2 号岩石铵梯炸药-辉绿岩 | 1.26       | 0.53          |
| 安尼梯炸药-石灰岩     | 1.59       | 0.92          |
| 安尼梯炸药-辉绿岩     | 1.36       | 0.80          |

## 4 结论与讨论

(1) 2 号岩石铵梯炸药对石灰岩和辉绿岩的爆炸作用计算结果与经验数值吻合较好。其爆炸做功系数偏高的原因有三: 一是假设柱形装药为轴对称起爆和爆轰波垂直入射孔壁, 与一般的实际情况, 即爆轰波平行孔壁传播, 有一定的差距; 二是在计算  $\Delta t = t_i - t_{i-1}$  时间内的爆炸做功系数时, 以  $P_x(t_i)$  作为  $\Delta t$  时间内的平均孔壁压力; 三是已有的实验资料不可能是在无限介质中得到的, 肯定会有炮孔堵塞不严密带来的能量损失, 而本文研究的是无限介质中的爆炸情况, 不涉及炮孔堵塞的能量损失问题;

(2) 当爆炸空腔在爆炸载荷作用下膨胀到最大限度时, 爆炸做功系数也达到最大值, 尽管这时炮孔内部仍有爆生气体, 其剩余的能量也对孔壁产生压力作用, 但炸药的爆速越高, 冲击波所占有的能量比例也越多;

(3) 根据本文选用的几种炸药和岩石的计算结果, 炸药与岩石的声阻越接近, 爆炸的做功系数就越高。石灰岩和辉绿岩的声阻抗分别为 8 300 600 和 18 195 800 m · kg/(s · m<sup>3</sup>); 2 号岩石铵梯和安尼梯炸药的声阻抗分别为 3 600 000 和 4 500 000 m · kg/(s · m<sup>3</sup>)。2 号岩石铵梯炸药与石灰岩的声阻抗比较接近, 故爆炸做功系数较高, 安尼梯炸药与石灰岩的匹配也如此;

(4) 2 号岩石铵梯炸药是常用的工业炸药品种, 石灰岩和辉绿岩也是有代表性的岩石种类。2 号岩石铵梯炸药对石灰岩的爆炸做功系数为 0.69, 对辉绿岩为 0.54, 相应的爆炸空腔分别是炮孔半径的 1.50 倍和 1.26 倍;

(5) 本文通过数值分别得到孔壁爆炸作用参量时间的变化规律, 为爆炸应力场的计算提供了确定边界的依据和方法。

### 参考文献

- 1 张奇等. 矿冶工程, 1989, 9(4): 15.
- 2 亨利奇丁(著), 熊建国等译. 爆炸动力学及其应用. 北京: 科学出版社, 1987, 245.
- 3 北京工业学院. 爆炸及其作用(上). 北京: 国防工业出版社, 1979, 225
- 4 哈努卡耶夫 A H(著), 刘殿中(译). 矿岩爆破物理过程. 北京: 冶金工业出版社, 1980, 63-68.
- 5 张奇. 爆炸与冲击, 1990, 10(1): 68.
- 6 朱瑞庚等. 见: 中国力学会第二届土岩爆破学术会议文集, 1982.