

岩石爆破能量分析的数值方法

张 奇

(西安矿业学院, 西安)

提 要

本文通过球形装药与岩石爆炸作用的力学分析, 给出确定爆炸能量利用率的数值方法。通过算例, 对于以破碎为主要目的的岩石工程爆破, 爆炸能量利用率约为 50%, 爆炸作用初期的爆炸能量传递率约为 40%。对于算例涉及到的炸药和岩石, 两者的波阻抗越接近, 爆炸能量利用率就越高。

一、前 言

在文献[1]的岩石爆炸能量分析中, 须要确定爆炸应力波在孔壁近区的衰减指数, 这是比较困难的。因此文献[1]给出的关于岩石爆破能量的分析方法并不十分理想。然而炸药与岩石的爆炸作用是一个复杂的物理过程, 爆炸作用参量随时间的变化规律没有解析解。本文考虑偶合球形装药, 中心起爆情况下的岩石爆炸作用问题, 并假定装药处于无限岩体内。通过力学模型和数值计算, 给出岩石爆破能量分析的数值方法。

二、爆炸能量分析模型的建立

反映爆炸能量利用情况最确切的参数是爆炸能量利用率^[1], 即炸药对岩石的爆炸做功与其本身潜能之比。前者涉及到爆炸洞壁压力、爆炸空腔膨胀等有关物理参量随时间的变化规律。

(一) 洞壁爆炸作用初始参数

装药爆炸瞬间作为爆炸作用过程的初始时刻, 相应的爆炸作用参数称为初始参数。因一般工业炸药的冲击阻抗往往小于岩石介质的冲击阻抗, 因此装药爆炸后在岩体内形成冲击波, 同时反射回爆炸产物中的也是冲击波。此时, 爆炸产物与岩体分界面处(即洞壁)冲击波初始压力 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 减低为分界面的运动速度 u_x 。根据爆轰波的基本关系有^[2]

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

其中 $\bar{P} = P_x/P_H$; D 是爆速; γ 是爆炸产物的等熵指数。对于岩体内的冲击波, 有

$$u_x = \sqrt{P_x \left(\frac{1}{\rho_{r0}} - \frac{1}{\rho_{rx}} \right)} \quad (2)$$

其中 ρ_{r0} 、 ρ_{rx} 分别为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可写成

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

其中 $B = \frac{1}{4} C_0^2 \rho_{r0}$, C_0 是岩石介质内的纵波波速; $\bar{p}_{rx}$ 是压缩比, $\bar{p}_{rx} = \rho_{rx}/\rho_{r0}$ 。由式(1)、(2)、(3)联立可求出 P_x 、 u_x 和 $\bar{p}_{rx}$ 。再由岩石介质中冲击波的质量守恒

$$C_p \rho_{r0} = (C_p - u_x) \rho_{rx} \quad (4)$$

其中 C_p 是冲击波波速, 进而可以求出岩石中的冲击波波速。由式(3)得

$$\rho_{rx} = \rho_{r0} \left(\frac{P_x}{B} + 1 \right)^{1/4}$$

上式代入式(2)有

$$u_x = \sqrt{\frac{P_x}{\rho_{r0}} \left[1 - \left(\frac{P_x}{B} + 1 \right)^{-0.25} \right]} \quad (5)$$

将式(1)和式(5)联立求出 P_x 。本文采用牛顿切线法数值求解。然后由式(5)得到 u_x , 由式(3)得到 $\bar{p}_{rx}$, 由式(4)得到 C_p 。

(二) 洞壁膨胀过程中参数的确定

洞壁获得爆炸初始参数以后开始膨胀运动。由于洞壁变形, 有一稀疏波传入爆轰产物。因爆生气体膨胀和洞壁变形, 洞壁爆炸作用参数将随时间而发生变化。在洞壁变形过程中, 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可写为

$$P_1(t) = A \rho^\gamma \quad (6)$$

其中 A 为常数。由式(6)可推出

$$P_1(t) = P_x(t - \Delta t) \left[\frac{R(t - \Delta t)}{R(t)} \right]^{3\gamma} \quad (7)$$

式中 Δt 是时间增量; $R(t - \Delta t)$ 和 $R(t)$ 分别是 $t - \Delta t$ 时刻和 t 时刻的洞壁空腔半径。如果 Δt 选得足够小, 则 t 时刻气体的膨胀速度 $u_1(t)$ 可视为 $t - \Delta t$ 时刻的洞壁变形速度 $u_x(t - \Delta t)$ 。在 t 时刻, 由于洞壁变形, 有一稀疏波传入爆生气体, 使爆生气体的膨胀速度 $u_1(t)$ 迅速增大到洞壁的变形速度 $u_x(t)$ 。而爆生气体的压力也相应地由 $P_1(t)$ 变为 $P_x(t)$, 因此在洞壁变形过程中, 对于爆生气体有

$$u_x(t) = u_1(t) + \int_{P_{x(t)}}^{P_1(t)} \frac{dP}{\rho C} \quad (8)$$

式中 C 是爆生气体内的声速, 可由下式确定

$$C = \sqrt{\frac{dP}{d\rho}}$$

由上式和爆生气体的等熵方程, 可得

$$\frac{C}{C_1} = \left(\frac{\rho}{\rho_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{2}}, \quad \frac{\rho}{\rho_1} = \left(\frac{P}{P_1} \right)^{1/\gamma}$$

$$C_1^2 = \gamma \frac{P_1}{\rho_1}$$

由上述三式可得

$$C_1(t) = C_1(t - \Delta t) \left[\frac{P_x(t - \Delta t)}{P_1(t)} \right]^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}}$$

其中 $C_1(t)$ 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。

将上述四式代入式(8)可得

$$u_x(t) = u_1(t) + \frac{2C(t)}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{P_x(t)}{P_1(t)} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right] \quad (9)$$

由洞壁岩体内的动量守恒、质量守恒和状态方程可以得到

$$u_x^2(t) = \frac{P_x(t)}{\rho_{r0}} \left[1 - \left(\frac{P_x(t)}{B} + 1 \right)^{-0.25} \right] \quad (10)$$

由式(9)和式(10)联立可求出 t 时刻的洞壁压力、洞壁变形速度等参量随时间的变化规律。

(三) 爆炸能量利用率

球形装药的潜能为

$$E = \frac{4}{3} \pi R_0^3 \rho_0 Q \quad (11)$$

式中 R_0 为装药半径, ρ_0 为装药密度, Q 为装药爆热。

装药爆炸对岩石的做功为

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

因 $dR = u_x(t) dt$, 故上式变为

$$E_1 = 2\pi \int_0^t R^2(t) P_x(t) u_x(t) dt \quad (12)$$

由式(11)、(12)得到爆炸能量的利用率

$$\eta = \frac{E_1}{E} = \frac{3}{2} \frac{\int_0^t R^2(t) P_x(t) u_x(t) dt}{R_0^3 \rho_0 Q}$$

令 $\bar{R} = R(t)/R_0$, $\bar{t} = t / \frac{R_0}{D}$, 则上式变为

$$\eta = \frac{3}{2} \frac{\int_0^{\bar{t}} \bar{R}^2(\bar{t}) P_x(\bar{t}) u_x(\bar{t}) d\bar{t}}{\rho_0 Q D} \quad (13)$$

三、数值方法与结果分析

(一) 数值方法

爆生气体的等熵指数 γ 是压力 $P_1(t)$ 的函数, 计算按下式取值

$$P_1(t) > 2 \times 10^8 \text{ Pa 时, 取 } \gamma = 3$$

$$P_1(t) \leq 2 \times 10^8 \text{ Pa 时, 取 } \gamma = 1.4$$

计算时, 首先求出洞壁作用初始压力、初始洞壁膨胀速度。而爆炸空腔膨胀半径为

$$R(t) = R_0 + \int_0^t u_x(t) dt$$

因 $u_x(t)$ 是未知函数, 因此无法精确求解, 采用数值积分上式可写成

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

其中 $N = t_i / \Delta t$, t_i 是数值计算中的时间。上式写成无量纲形式为

$$\bar{R}(\bar{t}) \doteq 1 + \frac{1}{D} \sum_{i=1}^N \Delta \bar{t} \bar{u}_x(\bar{t}) \quad (14)$$

其中 $\bar{\Delta t} = \Delta t / (R_0 / D)$

相应地, 式 (13) 写为

$$\eta = \frac{3}{2} \frac{\sum_{i=1}^N \bar{R}^2(\bar{t}) \bar{u}_x(\bar{t}) \bar{P}_x(\bar{t}) \Delta \bar{t}}{\rho_0 Q D} \quad (15)$$

由洞壁质点速度初值 $u_x(0)$ 和时间步长 Δt 求出 $R(\Delta t)$, 由洞壁压力初始值 $P_x(t=0)$ 、 $R(t=\Delta t)$ 和 R_0 求出 $P_1(t=\Delta t)$, 由 $C_1(t=0) = \frac{3}{4} D$ 和 $P_x(t=0)$ 、 $P_1(t=\Delta t)$ 求出 $C_1(t=\Delta t)$; 再由 $u_1(t=\Delta t)$ 和 $u_x(t=0)$ 求出 $P_x(t=\Delta t)$ 和 $u_x(t=\Delta t)$, 以及其他洞壁爆炸作用参量和爆炸能量利用率。重复上述计算, 由 $t_1 = \Delta t$ 时刻的有关参量, 进而求出 $t_2 = 2\Delta t$ 的有关参量。依次类推, 逐次叠代, 最后求出洞壁爆炸作用参量 $P_x(t)$ 、 $u_x(t)$ 、 $\bar{R}(t)$ 、 η 随时间的变化规律。

(二) 计算结果

算例中采用两种炸药: (1) 2 号铵梯岩石炸药, 参数为①: $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$, $D = 3600 \text{ m/s}$, $Q = 3761870 \text{ J/kg}$; (2) 安尼梯炸药, 参数为: $\rho_0 = 1000 \text{ kg/m}^3$, $D = 4500 \text{ m/s}$, $Q = 4435676 \text{ J/kg}$ 。

算例中采用两种岩石: (1) 灰岩, 其参数为: $\rho_{r0} = 2420 \text{ kg/m}^3$, $C_0 = 3430 \text{ m/s}$; (2)

①王廷武, 矿山爆破工程, 西安矿业学院, 1989年, 第56页。

辉绿岩, 其参数为: $\rho_{r0} = 2870 \text{ kg/m}^3$, $C_0 = 6340 \text{ m/s}$ 。

一般爆破工程中的最小抵抗是装药半径的30—40倍。装药爆炸以后, 在岩体内产生冲击波和应力波。当应力波由装药(洞壁)到达自由面时将发生反射。反射波由自由面到达洞壁时, 一般认为这时开始发生抛掷运动, 爆炸空腔完全破坏。因此计算分两组进行:

1. 一种炸药在两种岩石情况下爆炸作用的比较, 即2号铵梯岩石炸药在灰岩和辉绿岩中的爆炸作用计算。计算时间步长取 $\Delta t = R_0/D$; 计算时间范围取为 $0 \leq t \leq 68R_0/D$ 。

2. 两种炸药在一种岩石情况下爆炸作用的比较, 即2号铵梯岩石炸药和安尼梯炸药在灰岩中的爆炸作用计算。计算时间步长取为 $\Delta t = R_0/C_0$; 计算时间范围为 $0 \leq t \leq 68R_0/C_0$ 。

计算程序按框图(图1)编制。

表1和表2是2号铵梯岩石炸药在灰岩和辉绿岩中的爆炸作用参量随时间的变化规律。为比较, 取相对时间单位 $\bar{t} = t/(4R_0/D)$ 。表3和表4是2号铵梯岩石炸药和安尼梯炸药在灰岩中的爆炸作用参量随时间的变化规律。为比较, 也取相对时间单位 $\bar{t} = t/(4R_0/C_0)$ 。

(三) 结果分析

通过计算结果分析, 对于偶合球形装药, 提出如下几点看法:

1. 2号铵梯岩石炸药是用于工程爆破的具有代表性的工业炸药, 其威力适中。因此以破碎为主要目的的工程爆破(如松动爆破), 装药的爆炸能量利用率为50%左右。爆炸能量传递率随时间而增大。爆炸作用初期能量传递较快, 后期爆炸能量传递率增加缓慢。爆炸作用初期的能量传递率约占装药总能量的40%。安尼梯炸药的爆炸作用和能量传递更大一些。但象安尼梯炸药这样的高威力、高密度、高爆速的工业炸药在工程中很少使用, 因此没有代表性。

2. 根据表1、表2计算结果的比较以及表3、表4计算结果的比较, 可以看到炸药的波阻抗与岩石的波阻抗越接近, 爆炸能量利用率就越高。

3. 本文给出的确定爆炸能量利用率的数值方法, 可作为工程爆破选择装药品种的依

据, 也可作为研制新型炸药的参考。

4. 由计算结果看出, 硬岩洞壁爆炸压力较大, 爆炸空腔运动速度较小; 而软岩则相反。

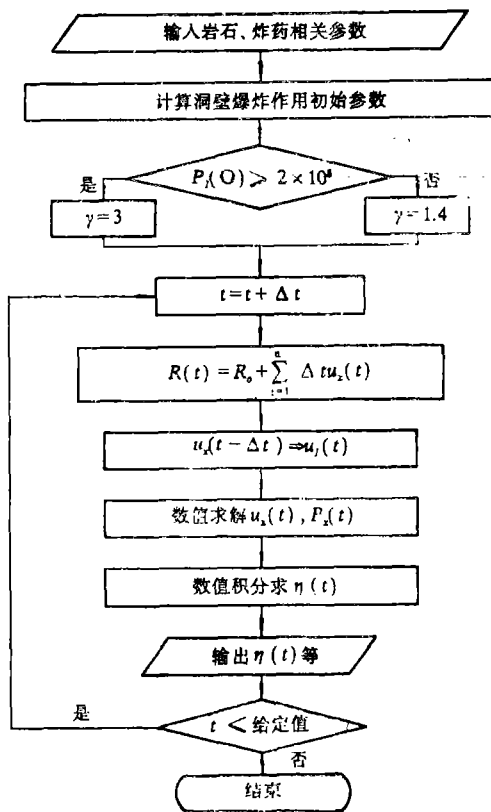


图1 计算程序框图

Fig.1 The chart of computing programme

表 1 2 号铵梯炸药对灰岩的爆炸作用参量

Table 1 The blast action parameters of explosive An Ti No.2 in limestone

$\bar{t}=t/(\frac{4R_0}{D})$	P_s (MPa)	u_s (m/s)	$\bar{R}(\bar{t})$	η
0	4911	500	1.000	0.00
1	771	90	1.288	0.46
2	449	53	1.349	0.50
3	321	38	1.400	0.52
4	251	30	1.439	0.52
5	207	25	1.470	0.53
6	188	22	1.496	0.54
7	176	21	1.520	0.54
8	165	20	1.543	0.54
9	156	19	1.565	0.55
10	148	18	1.585	0.55
11	140	17	1.604	0.55
12	134	16	1.623	0.55
13	128	15	1.640	0.56
14	123	15	1.659	0.56
15	118	14	1.673	0.56
16	113	14	1.688	0.56
17	109	13	1.703	0.57

表 2 2 号铵梯炸药对辉绿岩的爆炸作用参量

Table 2 The blast action parameters of explosive An Ti No.2 in diabase

$\bar{t}=t/(\frac{4R_0}{D})$	P_s (MPa)	u_s (m/s)	$\bar{R}(\bar{t})$	η
0	5901	306	1.000	0.00
1	1457	79	1.192	0.38
2	877	48	1.264	0.43
3	636	35	1.311	0.46
4	501	27	1.346	0.47
5	415	23	1.374	0.48
6	356	19	1.398	0.49
7	312	17	1.418	0.49
8	278	15	1.437	0.50
9	251	14	1.453	0.50
10	229	13	1.468	0.50
11	211	12	1.481	0.51
12	198	11	1.494	0.51
13	191	10	1.506	0.51
14	185	10	1.517	0.51
15	180	10	1.528	0.52
16	174	10	1.539	0.52
17	169	9	1.550	0.52

表 3 2 号铵梯炸药对灰岩的爆炸作用参量
Table 3 The blast action parameters of explosive
An Ti No.2 in limestone

$\bar{t}=t/(4R_0/C_0)$	P_s (MPa)	u_s (m/s)	$\bar{R}(\bar{t})$	η
0	4911	500	1.000	0.00
1	434	86	1.274	0.46
2	428	50	1.356	0.49
3	306	36	1.407	0.51
4	240	29	1.416	0.51
5	198	24	1.477	0.52
6	183	22	1.504	0.52
7	171	20	1.529	0.53
8	161	19	1.552	0.53
9	152	18	1.574	0.54
10	143	17	1.595	0.54
11	136	16	1.614	0.54
12	130	16	1.633	0.54
13	124	15	1.651	0.55
14	119	14	1.668	0.55
15	114	14	1.604	0.55
16	110	13	1.700	0.55
17	106	13	1.715	0.55

表 4 安尼梯炸药对灰岩的爆炸作用参量
Table 4 The blast action parameters of explosive
An Ni Ti in limestone

$\bar{t}=t/(4R_0/C_0)$	P_s (MPa)	u_s (m/s)	$\bar{R}(\bar{t})$	η
0	7258	695	1.000	0.00
1	742	87	1.331	0.62
2	437	52	1.423	0.65
3	314	37	1.466	0.66
4	247	29	1.506	0.67
5	204	24	1.538	0.67
6	185	22	1.565	0.67
7	173	21	1.590	0.68
8	163	20	1.614	0.68
9	154	18	1.636	0.68
10	146	17	1.657	0.68
11	139	17	1.677	0.69
12	132	17	1.696	0.69
13	126	16	1.714	0.69
14	121	15	1.731	0.69
15	116	15	1.748	0.69
16	112	14	1.764	0.69
17	108	13	1.780	0.70

参 考 文 献

- [1] 张奇等, 岩石与炸药匹配关系的能量分析, 矿冶工程, 第4期, 1989年, 第18页。
[2] 北京工业学院, 爆炸及其作用(上), 国防工业出版社, 1979年, 第225页。

Numerical Technique in Energy Analysis of Rock Blasting

Zhang Qi

(*Xian Institute of Mining, Xian*)

Abstract

Numerical technique of determining utilization coefficient of explosion energy is given through mechanical analysis on explosion of the spherical charge in rocks. The computing examples showed that the utilization coefficient of energy is about 50% in the blasting mainly for rupturing rocks, and the energy transmission ratio is about 40%. In addition, the closer wave impedances of both rock and explosive, the higher the utilization coefficient of energy.