

# 光面爆破装药不偶合系数的计算

费鸿禄 李守巨 何庆志

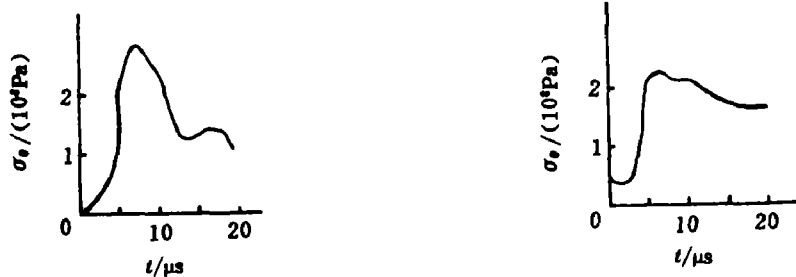
(阜新矿业学院 辽宁省阜新市 123000)

**摘要** 本文以爆轰气体动力学及岩石断裂理论为基础,给出了不偶合装药时的不偶合系数的计算方法;并分析了不偶合作用在光面爆破参数设计中的作用,通过计算值与实际试验取值对比,证明该计算方法是可靠的。

**关键词** 光面爆破 不偶合系数 断裂韧性

## 1. 引言

在目前矿山爆破工程中为保证爆破后的新自由面岩体保持完整,减小对岩体的破坏,大多采用不偶合装药来达到目的。现今采用以下几种结构形式:药卷之间留有空气柱,空气柱长度小于炸药的殉爆距离;增大空气柱长度,加导爆索串装;炮孔与药卷之间留有环向间隔,有的除此之外还在眼口炮泥与装药端之间留有一定长度的空气柱。矿山应用较多的是后一种方式来达到不偶合装药的目的,这种方法简单易行。为此,以这种方法来讨论不偶合系数的确定及不偶合作用。其作用见图1。



(a)不偶合系数为1.1

(a)For decouple coefficient 1.1

(b)不偶合系数为2.5

(b)For decouple coefficient 2.5

图1 不偶合系数作用图

Fig. 1 The effect of decouple coefficient to the shape of stress wave

## 2. 基本原理

炸药爆炸后,此时炮孔内爆生气体处于高温高压状态,气体产物开始膨胀,由于过程迅速,与周围介质没有热交换,因而是绝热的膨胀过程,采用下面绝热方程<sup>[1]</sup>来表达

$p_1 \geq p_x$  时有

$$p_0 V_0^K = p_1 V_1^K \quad (1)$$

式中:  $p_0$  ——炸药的爆炸压力(Pa);  $V_0$  ——装药体积( $\text{m}^3$ );  $p_1$  ——孔壁压力(Pa);  $V_1$  ——炮孔内膨胀的气体体积( $\text{m}^3$ );  $p_K$  ——临界压力( $p_K = 2 \times 10^8 \text{Pa}$ );  $K$  ——等熵指数( $K=3$ )。

$p_1 < p_K$  时有

$$p_1 V_1^\gamma = p_K V_K^\gamma \quad (2)$$

式中:  $\gamma$  ——绝热指数( $\gamma=1.3$ );  $V_K$  ——压力为  $p_K$  时的气体体积( $\text{m}^3$ )。

由(1)式得

$$V_K = \left(\frac{p_0}{p_K}\right)^{1/K} V_0 \quad (3)$$

将(3)式代入(2)式有

$$p_1 = p_K \left(\frac{p_0}{p_K}\right)^{\gamma/K} \left(\frac{V_0}{V_1}\right)^\gamma \quad (4)$$

爆压  $p_0$  采用下式计算

$$p_0 = \frac{\rho_0 f}{1 - \alpha \rho_0} \quad (\text{Pa}) \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  ——气体分子余容,  $\alpha = 10^{-3} \exp(-0.4 \times 10^{-3} \rho_0)$ , ( $\text{m}^3/\text{kg}$ );  $\rho_0$  ——炸药密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $f$  ——炸药力,  $f = (V'/273) T_1$  ( $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{kg}$ );  $V_1$  ——爆容( $\text{m}^3/\text{kg}$ );  $T_1$  ——爆温(K)。

(5)式采用文献[4]的算法计算,这种方法计算的结果与实际相符。

### 3. 不偶合装药系数的确定

假定炮孔堵塞物在裂隙贯通后抛出孔口,在这种条件下来考虑不偶合系数的确定。

#### 1. 考虑孔壁压力时不偶合系数确定方法

根据不偶合装药计算原则,孔壁压力  $p_1$  应不大于岩石动态下的抗压强度 $[\sigma]$ ,即

$$p_1 \leq [\sigma] \quad (6)$$

将(4)式代入(6)式

$$p_K \left(\frac{p_0}{p_K}\right)^{\gamma/K} \left(\frac{V_0}{V_1}\right)^\gamma \leq [\sigma] \quad (7)$$

将(7)式变成

$$\left(\frac{V_0}{V_1}\right)^\gamma \leq \frac{[\sigma]}{p_K} \left(\frac{p_K}{p_0}\right)^{\gamma/K}$$

$$\frac{V_0}{V_1} \leq \left(\frac{[\sigma]}{p_K}\right)^{1/\gamma} \left(\frac{p_K}{p_0}\right)^{1/K} \quad (8)$$

令

$$V_0 = \pi r_0^2 \phi L, \quad V_1 = \pi L, \quad e = r/r_0$$

其中:  $r_0$  ——装药半径(m);  $r$  ——炮孔半径(m);  $L$  ——除炮泥以外的孔深(m);  $e$  ——径向不偶合系数;  $\phi$  ——装药系数,  $\phi = L_0/L$ ;  $L_0$  ——装药长度(m)。则(8)式变为

$$e^2/\phi \geq \left(\frac{p_K}{[\sigma]}\right)^{1/\gamma} \left(\frac{p_0}{p_K}\right)^{1/K} \quad (9)$$

#### 2. 炮孔连线裂隙贯通时不偶合系数的确定

在岩体中进行成缝爆破时,由于相邻炮孔的存在,改变了炮孔壁附近的应力状态,造

成在炮孔连线方向上的拉应力集中,如图2所示。为简单起见,可将炮孔气体压力作用视为厚壁圆筒受内压作用的力学模型,弹性力学解为<sup>[6]</sup>

$$\sigma_r = p_i \left( \frac{r}{l_0 + r} \right)^2, \quad \sigma_\theta = -p_i \left( \frac{r}{l_0 + r} \right)^2 \quad (10)$$

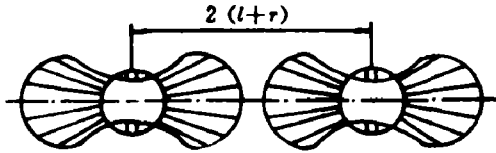


图2 孔壁拉应力分布

Fig. 2 The stress in the borehole wall

式中: $l_0$ ——环向拉应力; $\sigma_\theta$ 作用产生的径向裂隙长(m); $\sigma_r$ ——径向压应力(Pa);其余符号同前。

令 $\sigma_\theta$ 等于岩石的抗拉强度 $\sigma_s$ ,便求出 $l_0$

$$l_0 = r \left[ \frac{p_i}{\sigma_s} \right]^{1/2} - r \quad (11)$$

由于炮孔内气体作用,空腔增大,同时伴有裂隙产生,作用于孔壁的压力已经衰减,如果裂纹尖端区域内的强度因子小于岩体动态平面应变的断裂韧性值,裂纹扩展就停止。由于 $l_0$ 值较小(与炮孔孔距相比),故可设气体楔入岩体深度与裂纹扩展长度相等,考虑到气体的泄漏及孔内气体温度的降低,则孔壁压力变化为

$$p_i = p_i \left( \frac{r}{l+r} \right)^a \quad (12)$$

式中: $l$ ——裂纹扩展长度(m); $a$ ——应力衰减指数, $a=2$ 。

在 $p_i$ 作用下的应力强度因子为

$$K_I = p_i \sqrt{\pi(l+r)} \quad (13)$$

根据格里菲斯强度理论,在平面应变条件下其断裂韧性为

$$K_{IC} = \sqrt{\frac{2ET}{1-\nu^2}} \quad (14)$$

式中: $E$ ——弹性模量(kg/cm<sup>2</sup>); $T$ ——单位表面能; $\nu$ ——泊松比。

在准静态气体作用下,可以认为裂隙表面受到的张力与炮孔内的气体压力相等。则保证能量最大限度的利用,由(13)式和(14)式有

$$K_I \geq K_{IC}$$

即

$$p_i \sqrt{\pi(l+r)} \geq K_{IC} \quad (15)$$

将(12)式代入(14)式有

$$p_i \left( \frac{r}{l+r} \right)^2 \sqrt{\pi(l+r)} \geq K_{IC} \quad (16)$$

将(5)式代入(16)式有

$$\frac{e^2}{\phi} \leq \left( \frac{p_K}{K_{IC}} \right)^{1/2} \left( \frac{p_0}{p_K} \right)^{1/K} (l+r)^{-(3/2)r} r^{2/r} \pi^{1/2r} \quad (17)$$

至此得到了既考虑在孔壁不产生粉碎区,又使裂隙扩展而贯通的条件,导出了不偶合系数确定的计算公式(10)、(17)。

#### 4. 实例计算

某矿斜井掘进采用2号岩石硝铵炸药,具体条件<sup>[2]</sup>如下:炸药的热力学参数为: $p_0 =$

$10^3\text{kg/m}^3$ ; 爆速  $D=3600\text{m/s}$ , 爆热  $Q=3651.56\text{kJ/kg}$  ( $872.16\text{kCal/kg}$ ), 爆压  $p_0=27.76 \times 10^8\text{Pa}$ ; 岩石抗压强度  $[\sigma]=1.054 \times 10^8\text{Pa}$  (流纹岩, 中硬);  $K_{IC}=60\text{kg/cm}^{3/2}$ ,  $r=2.1 \times 10^{-2}\text{m}$ ,  $l=20.4 \times 10^{-2}\text{m}$ 。将上述值代入(9)式得  $e/\phi^{1/2} \geq 1.98$ , 由(17)式得  $e/\phi^{1/2} \leq 2.16$ 。在  $\phi=1$  时,  $1.98 \leq e \leq 2.16$ 。

在文献[2]中孔距为  $0.45\text{m}$ , 单孔应形成裂隙长为  $l=20.4 \times 10^{-2}\text{m}$ , 孔径  $r=2.1 \times 10^{-2}\text{m}$ , 线装药密度  $q=280 \times 10^{-3}\text{kg/m}$ , 孔深为  $1.5\text{m}$ , 将其变成线密度为  $10^{-3}/\text{m}$  的药柱, 除去  $0.3\text{m}$  的炮泥, 则换算为装药半径为  $1.05 \times 10^{-2}\text{m}$ , 密度为  $10^3\text{kg/m}^3$  的炸药, 其不偶合系数  $e'=2.1/1.05=2.0$ , 这一值在文献[2]中的实验方法证明效果理想, 且理论计算的不偶合系数与实际一致。说明该计算方法是可行的。

### 5. 对比与讨论

在保证孔壁不被粉碎的条件下由公式(10)的计算值与文献[3]计算值进行比较, 见表1。从表1可以看出该算法计算出的数值与实际取值基本相符。故可将(10)式用于光面爆破设计中。

表1 不偶合系数对比表

Table 1 Table of comparison of the decoupling coefficient

试验单位	岩石条件(Pa)	e 计算值 <sup>[3]</sup>	e 计算值	e 试验值
栾川钼矿	砂长岩 $2.7 \times 10^8$	1.21	1.37	1.25
厂坝铅锌矿	石英闪长岩 $1.8 \times 10^8$	1.41	1.61	1.54
板石沟铁矿	伟晶岩 $1.5 \times 10^8$	1.51	1.73	1.6
汉江钢铁厂	石灰岩 $1.05 \times 10^8$	1.73	1.98	1.82

通过上面的讨论与计算可得出以下几点结论:

(1) 本文的理论推导考察了两个方面的: 一是不使孔壁粉碎; 二是又能使裂纹贯通。因此计算值是较客观的;

(2) 本文实际上以是径向不偶合系数(也即装药系数  $\phi$ )和轴向不偶合系数( $e$ )来表达的。若  $r$  与  $r_0$  已定可调整  $\phi$  或装药密度  $\rho_0$  达到较好的光爆效果;

(3) 若以(9)式确定出  $e/\phi^{1/2}$ , 则可通过(17)式确定出光面爆破时的孔距, 即为  $2(l+r)$ ;

(4) 在确定装药直径( $2r_0$ )时, 应不小于保持炸药稳定爆轰的临界直径。

### 参 考 文 献

- [1] J. 亨利奇著, 熊建国等译. 爆炸动力学及其应用. 北京: 科学出版社, 1987, 63
- [2] 费鸿禄, 斜井掘进爆破参数计算机模拟的研究, [硕士论文]. 阜新市: 阜新矿业学院, 1989
- [3] 秦明武. 光面爆破中不偶合作用分析. 爆破, 1988, (2), 4
- [4] 何庆志, 李守巨, 费鸿禄. 炸药爆炸反应方程及其热力学参数的计算机模拟. 阜新矿业学院学报, 1989, 8(4), 36~43
- [5] 徐芝纶编. 弹性力学简明教程. 北京: 人民教育出版社, 1982, 89

---

## DETERMINATION OF DECOUPLE COEFFICIENT AND ANALYSIS OF DECOUPLE ACTION IN THE SMOOTH BLASTING

Fei Honglu Li Shouju He Qingzhi

(*Fuzin Mining Institute, Liaoning Fuzin 123000*)

**ABSTRACT** Basing on th detonation dynamics and rock fracture theory, this paper gives the calculating method of decouple coefficent; studies the decouple action of charge in smooth blasting, and proves this method is reliable through comparing the calculated value with that of the test.

**KEY WORDS** smooth blasting, decouple coefficient, fracture toughness