

# 对光面爆破理论的探讨

罗章喜

(1981年4月16日收到)

本文作者提出了一种确定两炮孔间极大间距的方法,推导了求两炮孔联线上切应力和拉应力的计算公式。又给出了在光面爆破工程中应用的其他参量。

## 一、炸药在炮孔内爆炸对岩石的作用

炸药在炮孔内爆炸对岩石的作用有二: 1. 爆炸冲击波的作用; 2. 爆生气体膨胀对孔壁的压力。

### 1. 爆炸冲击波的作用

它是爆生气体以极大的速度与围周介质发生碰撞,在极短的时间内向相邻质点传递运动的过程。所以它是以波的形式向外传播能量。它使质点获得径向向外的运动速度,使得岩石切向受拉,这是岩石在炮孔周围形成破坏范围的主要原因。由于冲击波作用时间极短,质点间的碰撞属弹性碰撞,因此,虽然冲击波压力很大,岩石并不因冲击波作用而压坏。在破坏范围以外,冲击波可视为弹性波。在破坏范围边界上的切向拉应力应等于岩石的抗拉强度。

对于柱状装药的径向破坏半径,可按下列式计算:

$$r_p = m k_{\text{岩}} \sqrt{\frac{C_{\text{岩}}}{1.5}} \quad (1)$$

式中:  $r_p$ ——装药对岩石的径向破坏半径;  $k_{\text{岩}}$ ——岩石的抗破坏屈服系数(见表1);  $m$ ——完全填塞系数,当  $f \leq 2$  时  $m = 1.65$ ,  $f \geq 2$  时  $m = 1.53$ ; 1.5——硝铵炸药对 TNT 炸药的折算系数;  $C_{\text{岩}}$ ——有效装药量,单位公斤。

$$C_{\text{岩}} = (3\pi/4) d_i^3 \rho_0$$

式中:  $d_i$ ——装药直径(米);  $\rho_0$ ——炸药密度,硝铵炸药为 1000 公斤/米<sup>3</sup>。

一般构筑地下工程选择的岩石条件  
 $f > 2$

表1 岩石的抗破坏屈服系数

| $f$            | 4~6  | 8    | 10   | 12   |
|----------------|------|------|------|------|
| $k_{\text{岩}}$ | 0.56 | 0.53 | 0.51 | 0.48 |

$$\therefore r_p = 17.8 k_{\text{岩}} d_i \quad (2)$$

如忽略周围岩石吸收的能量, 则根据能量守恒定律, 破坏范围以外任何一个应力波阵面上的总机械能应等于破坏范围边界上的总机械能。

$$\therefore (1/2)\rho \cdot 2\pi r_p v u_p^2 dt = (1/2)\rho \cdot 2\pi r v u^2 dt \quad (3)$$

$$\text{即} \quad u = \sqrt{\frac{r_p}{r}} u_p \quad (4)$$

式中,  $\rho$ ——岩石的密度;  $r_p$ ——岩石的破坏半径;  $r$ ——所求波阵面的半径;  $v$ ——波的传播速度,  $v = \sqrt{E/\rho}$ ;  $E$ ——岩石的弹性模量;  $dt$ ——时间微量,  $dt \rightarrow 0$ ;  $u_p$ ——破坏范围边界上质点运动速度,  $u$ ——所求波阵面上质点运动速度。

半径为  $r$  的波阵面上介质的径向应变  $\varepsilon_n$  和切向应变  $\varepsilon_t$  分别为:

$$\varepsilon_n = \frac{(r + \bar{u} \cdot T/4) - r}{r} = \frac{T}{4r} \bar{u} = \frac{Tu}{8r} \quad (5)$$

$$\varepsilon_t = \frac{2\pi(r + \bar{u} \cdot T/4) - 2\pi r}{2\pi r} = \frac{T}{4r} \bar{u} = \frac{Tu}{8r} \quad (6)$$

式中,  $\bar{u}$ ——质点由  $0$  到  $u$  的平均速度,  $\bar{u} = u/2$ ;  $T$ ——波的传播周期。根据广义虎克定律得

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E} - \mu \frac{\sigma_n}{E} = \frac{Tu}{8r} \quad (7)$$

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma_n}{E} - \mu \frac{\sigma_t}{E} = \frac{Tu}{8r} \quad (8)$$

解 (7)、(8) 式得

$$\sigma_t = \sigma_n = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{Tu}{8r} \quad (9)$$

同理

$$\sigma_{r_p} = \sigma_{r_n} = \frac{E}{1-\mu} \cdot \frac{Tu_p}{8r_p} = [\sigma_r] \quad (10)$$

(9)  $\div$  (10) 得

$$\frac{\sigma_t}{[\sigma_r]} = \frac{ur_p}{ur} \quad (11)$$

即

$$\sigma_t = \frac{ur_p}{ur} [\sigma_r] \quad (12)$$

将 (4) 式代入 (12) 式得

$$\sigma_t = \frac{\sqrt{r_p/ru} r_p}{ur} [\sigma_r] = \sqrt{\frac{r_p^3}{r^3}} [\sigma_r] \quad (13)$$

式中:  $\sigma_t$ ——介质的切向应力;  $\sigma_n$ ——介质的径向应力;  $[\sigma_r]$ ——岩石的抗拉强度;  $\sigma_{r_n}$ ——破坏边界上介质的径向应力;  $\sigma_{r_p}$ ——破坏边界上介质的切向应力; 单位均为公斤/厘米<sup>2</sup>。

在炮孔连线上, 由两炮孔传来的切向拉应力方向相同, 以代数和的方式叠加。

设相邻两炮孔的距离为  $a$ , 因此, 炮孔连线上距其中一个炮孔的距离为  $r$  处的应力为:

$$\sigma = \left[ \sqrt{\frac{r_p^3}{r^3}} + \sqrt{\frac{r_p^3}{(a-r)^3}} \right] [\sigma_c] \quad (14)$$

令  $\sigma' = 0$ , 可求得  $r = a/2$  时  $\sigma$  有极值, 经验证, 当  $r = a/2$  时  $\sigma' > 0$

$$\therefore \sigma_{min} = 2 \sqrt{\frac{8r_p^3}{a^3}} [\sigma_c] \quad (15)$$

炮孔连线上各点的切向拉应力叠加, 比别处切向拉应力的叠加值都大。如果考虑实际周边孔起爆总是存在不可避免的允许时差, 实际叠加拉应力按计算值的 80% 来考虑。按装药部分炮孔连面形成裂缝条件得:

$$0.8\sigma_{min} = 1.6 \sqrt{\frac{8r_p^3}{a^3}} [\sigma_c] > [\sigma_c]$$

解之得:

$$a \leq er, \quad (16)$$

式中:  $a$ ——周边孔间距;  $r_p$ ——装药对岩石的径向破坏半径;  $e$ ——相互作用系数,  $e = 2.72$ 。

值得注意的是, 各炮孔径向向外传播的应力波, 到达自由面要产生反射。反射波与原波的叠加会改变炮孔周围的应力分布情况, 这就难以保证装药部分炮孔连面上切向应力叠加值比别处切向应力叠加值大。所以要求各炮孔应力波到达自由面之前, 两炮孔应力波在炮孔连线上的叠加已完成。也就是说炮孔的最小抵抗线应比炮孔间距大些, 才能保证装药部分炮孔连面裂隙形成。而不至在炮孔之间留下岩埂。通常最小抵抗线与炮孔间距应满足下列关系:

$$a/W = 0.8 \sim 1.0 \quad (17)$$

式中:  $W$ ——最小抵抗线。

## 2. 爆生气体膨胀对孔壁的作用

炸药爆后过一定时间, 爆生气体在孔内可近似认为处于平衡态。爆生气体膨胀压力作用时间较长, 在炮孔破裂之前压力都较大, 是造成孔壁压缩破坏的原因。同时, 爆生气体对孔壁的挤压是造成炮孔不装药部分两炮孔间的岩石因受拉破坏而形成光面裂隙的原因。要保留完整无损的孔壁, 要求气体对孔壁压力小于等于岩石的抗压强度。要形成炮孔间裂缝, 要求爆生气体对孔壁压力尽可能大些。因此, 爆生气体对孔壁压力等于岩石的抗压强度为最好。这是靠小于炮孔直径的装药直径来实现的。能满足这一条件的炮口直径与装药直径的比, 称为最佳不偶合装药系数  $k_D$ , 这种装药结构, 称为最佳不偶合装药。  $k_D$  值为

$$k_D = d_2/d_1$$

式中:  $d_1$ ——装药直径;  $d_2$ ——炮孔直径, 在实用中是根据施工现场使用的钻头决定的。

根据绝热方程<sup>(1)</sup>

$$[\sigma_c] (\pi d_2^2/4)^\gamma = p (\pi d_1^2/4)^\gamma$$

$$\therefore [\sigma_c] = (d_1/d_2)^{2\gamma} p \quad (19)$$

式中:  $[\sigma_c]$ ——岩石的抗压强度 (为静态强度的 1.5~2 倍);  $\gamma$ ——绝热指数, 对于硝酸类国产

炸药  $\gamma = 1.3 \sim 1.4$  <sup>(1)</sup>;  $P$ ——爆生气体初始压力。每公斤爆生气体的初始压力, 由 *Abel* 方程求得 <sup>(1)</sup> :

$$P_0 V = \frac{nRT}{(1-a\rho_0)V} = \frac{nRT\rho_0}{1-a\rho_0} \approx nRT\rho_0 = F\rho_0 \quad (20)$$

式中:  $P_0$ ——1公斤炸药爆生气体初始压力;  $n$ ——1公斤炸药爆生气体克分子数;  $R$ ——气体常数;  $T$ ——爆温(绝对温标);  $a$ ——爆生气体分子余容  $a \approx 0.001V$ ;  $V$ ——1公斤炸药爆生气体初始体积, 也就是1公斤炸药的体积;  $F$

——炸药力,  $F = nRT$  (见表2)。

表2 各种炸药的炸药力<sup>(1)</sup>

| 炸药名称 | $F = nRT$<br>(公升·大气压/公斤) | 炸药名称 | $F = nRR$<br>(公升·大气压/公斤) |
|------|--------------------------|------|--------------------------|
| 黑火药  | 2720                     | 硝化甘油 | 11920                    |
| 梯恩梯  | 8350                     | 硝铵炸药 | 4350                     |
| 黑索金  | 11240                    | 铵黑炸药 | 6000                     |

$$\therefore P = \rho_0 \frac{1}{4} \pi d_1^2 \rho_0 = \frac{\pi}{4} d_1^2 F \rho_0^2 \quad (21)$$

将(21)式代入(19)式得

$$[\sigma_r] = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^{2\gamma} \cdot \frac{\pi}{4} d_1^2 F \rho_0^2 = \frac{\pi F \rho_0^2 d_1^{2(\gamma+1)}}{4 d_2^{2\gamma}}$$

解之得

$$d_1 = \exp\left(\frac{\ln[\sigma_r] + 2\gamma \ln d_2 + \ln 4 - \ln F - 2 \ln \rho_0}{2(\gamma+1)}\right) \quad (22)$$

只要求得  $d_1$  就可以通过 (18) 式求得最佳不偶合系数。

值得注意的是, 从炸药力表查得  $F$  的数据单位是: 公升·大气压/公斤, 应化成: 厘米<sup>3</sup>·(公斤/厘米<sup>2</sup>)/克。这样  $\rho_0$  的单位取: 克/厘米<sup>3</sup>,  $[\sigma_r]$  的单位取: 公斤/厘米<sup>2</sup>。  $d_1$ 、 $d_2$  的单位均取厘米。因此查得的  $F$  值应乘以 1.03。

对于硝铵炸药, 查表得  $F = 4350$ , 乘以 1.03 后  $F = 4480$  厘米<sup>3</sup>·(公斤/厘米<sup>2</sup>)/克。  $\gamma = 1.3 \sim 1.4$ , 我们取  $\gamma = 1.35$  进行计算, (22) 式可变为:

$$d_1 = \exp\left(\frac{2.7 \ln d_2 + \ln[\sigma_r] - 1.737}{4.7}\right) \text{厘米} \quad (23)$$

按公式 (23) 计算, 炮孔直径  $d_2 = 40$  毫米时装药直径  $d_1$  的结果如表 3。

表3  $d_2 = 40$  毫米, ( $2.7 \ln d_2 = 2.7 \ln 4 = 3.75$ ) 药径计算表

| $f$                 | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    |
|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $[\sigma_r] = 1.5R$ | 600   | 750   | 900   | 1035  | 1200  | 1450  | 1500  | 1650  |
| $\ln[\sigma_r]$     | 6.42  | 6.62  | 6.80  | 6.95  | 7.10  | 7.28  | 7.31  | 7.41  |
| $d_1$ (毫米)          | 15.28 | 15.90 | 16.50 | 17.20 | 17.75 | 18.45 | 18.58 | 18.92 |
| $[\sigma_r] = 2R$   | 800   | 1000  | 1200  | 1400  | 1600  | 1800  | 2000  | 2200  |
| $\ln[\sigma_r]$     | 6.69  | 6.91  | 7.10  | 7.25  | 7.38  | 7.50  | 7.60  | 7.78  |
| $d_1$ (毫米)          | 16.20 | 16.95 | 17.75 | 18.30 | 18.82 | 19.30 | 19.80 | 20.50 |

由表的  $d_1$  值可知  $K_0$  值在 2 ~ 2.6 之间, 因此, 通常光面爆破采用不偶合系数为 2 左右的不偶合装药是有理论根据的。

按 (23) 式决定装药直径, 再用 (18) 式就可计算出最佳不偶合系数。当计算的装药直径小于传爆直径时, 实际装药直径采用大于或等于最小传爆直径。否则就要采用导爆索起爆。

在工程实践中, 往往采用相同的装药量。在岩石条件相同, 最小抵抗线、炮孔间距、炮孔深度、炮孔直径相同的条件下, 采用几种不同的装药直径, 炮孔连面上的光面裂隙都能形成。所不同的只是炮孔装药部分破碎的程度略有差别, 有的完整无损; 有的可看见微小裂缝; 有的孔壁有微小剥落; 有的孔壁痕迹不清楚了。但是岩壁超挖量都能控制在允许范围内。因此, 可以根据 (23) 式计算的装药直径, 按最佳不偶合装药来计算光面爆破周边孔的装药量。

既然认定炮孔不装药部分炮孔间的光面裂隙是由于受拉而破坏的, 那么作用在拉裂面上的力应该是分布在拉裂面上大小等于岩石抗拉强度的均布荷载。这样就可以把炮孔间距为宽度的最小抵抗线, 视为悬臂梁进行计算。(如图)

$$\therefore a/W = 0.8$$

$$\therefore W = a/0.8$$

当  $a = 50$  厘米时,  $W = 62.5$  厘米, 取  $W = 60$  厘米来计算, 通常光面爆破炮孔深度为 150

厘米, 故  $W/l = 60/150 = 3/5 > 1/3$ , 属厚梁, 不会因受弯而破坏。所以梁是受剪破坏的。

$$\text{最大剪力: } R_{\max} = [\sigma_c] \cdot d_2 a l - [\sigma_c] \cdot a (1-\alpha) l$$

$$\therefore \frac{[\sigma_c] \cdot d_2 \cdot \alpha l - [\sigma_c] a (1-\alpha) l}{W a} \geq [\tau] \quad (24)$$

解之得:

$$\alpha \geq \frac{aW[\tau] + [\sigma_c] a l}{([\sigma_c] d_2 + [\sigma_c] a) l} \quad (25)$$

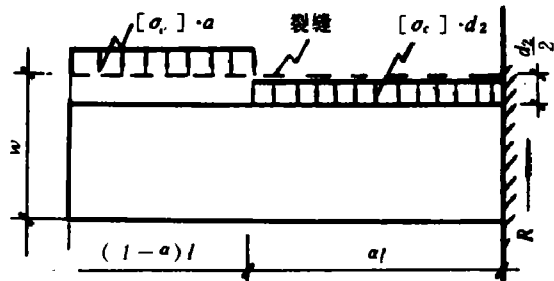
式中:  $\alpha$ ——装填系数 (装药长度与炮孔长度之比);  $l$ ——炮孔长度 (厘米);  $[\tau]$ ——岩石的抗剪强度 (公斤/厘米<sup>2</sup>)。

岩石的各种强度可查表<sup>[2]</sup>求得。例如: 石灰岩, 查表求得:  $[\sigma_c] = 700$  公斤/厘米<sup>2</sup>,  $[\sigma_t] = 43$  公斤/厘米<sup>2</sup>,  $[\tau] = 58$  公斤/厘米<sup>2</sup>, 按  $a = 50$  厘米、 $W = 60$  厘米、 $l = 150$  厘米计算  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{aW[\tau] + [\sigma_c] a l}{([\sigma_c] d_2 + [\sigma_c] a) l} = \frac{50 \times 60 \times 58 + 43 \times 50 \times 150}{(700 \times 50 + 43 \times 50) \times 150} = 0.67$$

装填系数求得后, 就可以算出炮孔需要的装药量  $q$ 。

$$q = \frac{\pi}{4} \cdot d_1^2 \cdot \alpha l \rho_0 \quad (\text{克}) \quad (26)$$



式中： $\rho_0$ ——炸药密度，对硝酸炸药， $\rho_0 = 1$ 克/厘米<sup>3</sup>。因此，对  $f = 7$  的石灰岩进行光面爆破，当炮孔间距为 50 厘米，炮孔长度 150 厘米，最小抵抗线 60 厘米，炮孔直径 40 毫米的情况下需要的装药量是

$$q = \frac{\pi}{4} \times 1.83^2 \times 0.67 \times 150 \times 1 = 264 \text{ (克)}$$

## 二、结 论

1. 用爆炸冲击波在炮孔连线上产生的切向拉应力的叠加来决定炮孔的最大间距。

即：

$$a \leq e r_p$$

如果周边孔能保证同时起爆， $e = 3.17$ 。如果允许一定起爆时差，最小拉应力按计算叠加值的 80% 考虑， $e = 2.72$ 。我们取标准药卷 32 毫米直径来计算，光面爆破所能达到的最大间距：

$$r_p = 17.8 K_q d_i = 17.8 \times 0.53 \times 3.2 = 30.2 \text{ (厘米)}$$

取  $e = 2.72$ ， $a = 82$  厘米 取  $e = 3.17$ ， $a = 96$  厘米

炮孔间距的经验数据是 50 ~ 80 厘米，因此采用 (16) 式计算最大炮孔间距是可行的

为了开挖幅员规整，同时控制炮孔装药量不至于太大，炮孔间距以采用 50 ~ 60 厘米为好。特别是曲线部分，甚至可以取 40 厘米。

2. 按 (23) 式计算装药直径确定的最佳不偶合系数，在  $f = 4 \sim 11$  时， $K_p = 1.95 \sim 2.5$ 。由于目前硝酸炸药最小传爆药直径为 20 毫米。按目前经验采用 40 毫米左右的炮孔直径进行光爆，不偶合系数为 2 左右效果较好。这说明用 (23) 式计算装药直径的理论与实际是相符的。

3. 按 (25) 式计算装填系数确定周边孔装药量，在  $f = 7$  的石灰岩中  $q = 264$  克，目前光面爆破经验采用的装药量为 0.15 ~ 0.25 公斤/米， $q = 225 \sim 375$  克 说明计算结果与经验相符，所以采用 (25)、(26) 式计算装药量是可行的。

## 参 考 文 献

- (1) 胡峰，“井巷快速光爆的初步研究与试验”，科学技术成果报告 0171 号，科学技术文献出版社 (1980)。  
 (2) 王鸿渠、陈建平，“爆破工程地质”，人民交通出版社 (1980)。

## INVESTIGATIONS ON THE THEORY OF SMOOTH SURFACE BLAST

Luo Zhangxi

### Abstract

In this paper, the author proposed a method on determining the maximum distance between two blasting holes, and derives formulas of calculating shearing and pulling stresses at the line connecting two blasting holes, some other methods of determining parameters which are useful in smooth surface blasting engineering are also given.