

倾斜边界条件爆破漏斗特性的研究

王 鸿 渠

(土木工程学系)

【摘要】 通过大量倾斜边界条件下的工程爆破实践，总结了斜坡地形爆破漏斗的特点。经过几何推导，得出了倾斜地形爆破漏斗的体积和面积的计算公式，并由试验观测得到缓斜坡地形爆破效果随坡度变化的规律。

关键词：倾斜边界条件，崩塌漏斗，爆破作用半径，多边界爆破作用指数，卧置椭圆锥体

1 倾斜边界条件爆破漏斗的特点

根据大量试验和工程实践观测可知，倾斜边界与水平边界的爆破漏斗大不相同。其主要特点有（见图1）：

1) 水平边界爆破漏斗口是圆形，呈倒立的圆锥体，而倾斜边界爆破漏斗口是垂直于等高线的椭圆形，呈卧置的椭圆锥体，其短轴平行于等高线方向，长轴垂直于等高线方向，水平投影是平行于等高线的椭圆形。

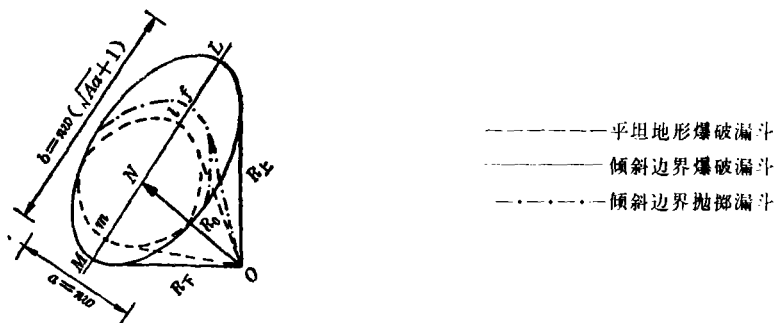


图1 倾斜边界爆破漏斗示意图

2) 倾斜边界爆破漏斗除包含一个水平边界的爆破漏斗外，还有一个崩塌漏斗。倾斜边界抛掷漏斗 MOf 比水平边界抛掷漏斗 mOl 大。

3) 爆破作用半径分为下爆破作用半径($R_{下}$)和上爆破作用半径($R_{上}$)。 $R_{下}$ 一般略大于平地的抛掷作用半径 R_0 ，在药包性质指数 $F(E, \alpha) \leq 1$ 的较大范围内， $R_{下}$ 和下爆破漏斗口半径($r_{下}$)并不随药包量的大小或按爆破作用指数(n)成比例的减小，而基本上是一个常数，相当于水平边界爆破作用指数 $n_0 = 1$ 时的大小。 $R_{下}$ 由(1)式计算^[1]。

$$R_{下} = \omega \sqrt{K_{下} \cdot n^2 + 1} \quad (1)$$

式中 $K_{下}$ 为安全系数。当 $F(E, \alpha) < 1$ 时， $K_{下} = 0.5 + 0.8f(\alpha)$

$$n=1, f(\alpha) = \begin{cases} 1 - \frac{\alpha^2}{7000} & \alpha < 30^\circ \\ 26/\alpha & \alpha > 30^\circ \end{cases}$$

当 $F(E, \alpha) \geq 1.0$ 时, $K_{\text{下}} = 1, n \geq 1$.

$R_{\text{上}}$ 一般是指破坏作用半径. 它比抛掷作用半径大, 并随坡度的增加而增加. 将公路工程大量倾斜边界爆破后实测的 $R_{\text{上}}$ 、 $R_{\text{下}}$ 经数学整理后得知, $R_{\text{上}}$ 与 $R_{\text{下}}$ 存在以下关系:

在软石、节理发育风化严重的次坚石中

$$R_{\text{上}} = \left(1 + \frac{\alpha^2}{5000}\right) R_{\text{下}} \quad (2)$$

在次坚石、坚石中

$$R_{\text{上}} = \left(1 + \frac{\alpha^2}{7000}\right) R_{\text{下}} \quad (3)$$

此外, 根据以上相同资料得到下列经验公式^[2]

$$R_{\text{上}} = w \sqrt{A \alpha_{\text{上}} \cdot n^2 + 1} \quad (4)$$

式中 $\alpha_{\text{上}}$ 为最小抵抗线与 $R_{\text{上}}$ 之间的自然地面坡度($^\circ$); A 为崩塌系数, 与岩性有关, 处于 0.05~0.12 之间, $A \alpha_{\text{上}}$ 的最小值为 1.

4) 在大量实践中, 倾斜边界抛掷药包爆破作用指数(n)以下漏斗口半径为标准. 即当药包量不变时, 直接测量实际的爆破作用指数(实测爆破漏斗口下部半径 r).

现将其中当 $F(E, \alpha) = 1.65$ 时的一组资料绘入图

2.

图中 1 为平坦地形爆破作用指数 $n_0, n_0 = n_{\text{包}} = 1.26$ ($n_{\text{包}}$ 为包列斯柯夫公式的爆破作用指数); 曲线 2 为多边界条件下爆破作用指数 n_{α} . 由图可看出:

1) 实际的下爆破漏斗口爆破作用指数 $n_{\text{下}}$ 很分散, 受地质构造面和软弱程度的影响甚大, 因此, 在生产中直接用测到的 $n_{\text{下}}$ 检验设计的 $n_{\text{下}}$ 比较困难.

2) 曲线 2 为实际 $n_{\text{下}}$ 的低限, 并与地面坡角成正比. 当炸药量一定时, 爆破作用指数 n_{α} 不是常数, 而是抛掷率(E)和地面坡度(α)的函数, 即

$$n = \left(\frac{E}{55} + 0.51\right) \sqrt{f(\alpha)} \quad (5)$$

3) 曲线 1 附近的点甚少, 说明在 $\alpha = 30^\circ \sim 60^\circ$ 之间 n_0 值偏小.

由此可知, 在倾斜地形的条件下, 抛掷爆破漏斗的其他尺寸, 如爆破漏斗口半径和抛掷漏斗体积将随坡角的增大而增大. 倾斜地形爆破作用指数为

$$n_{\alpha} = \frac{r_{\text{下}}}{w}$$

5) 倾斜边界爆破漏斗的体积比水平边界爆破漏斗体积大得多, 并随自然地面坡度的增加而迅速增加, 而单位体积的耗药量将降低.

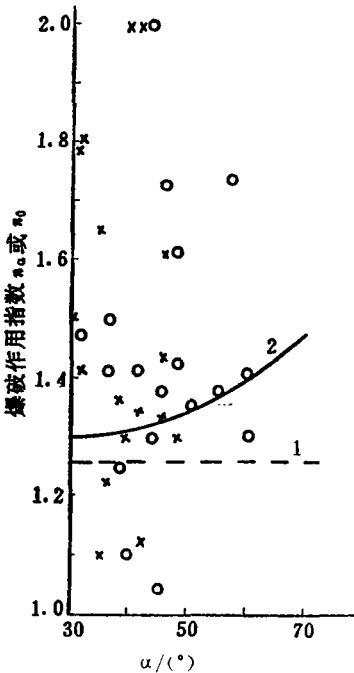


图 2 当 $F(E, \alpha) = 1.65$ 时, 多边界爆破作用指数与坡角的关系

2 倾斜边界爆破漏斗的体、面积和有关尺寸的计算

1 一个药包的爆破漏斗体面积公式

根据倾斜边界爆破漏斗的特性, 绘成爆破漏斗(图3)并由此图推算出爆破漏斗、崩塌漏斗的积体、面积和爆破漏斗口椭圆的长轴、短轴等有关尺寸。设爆破漏斗口椭圆长轴为

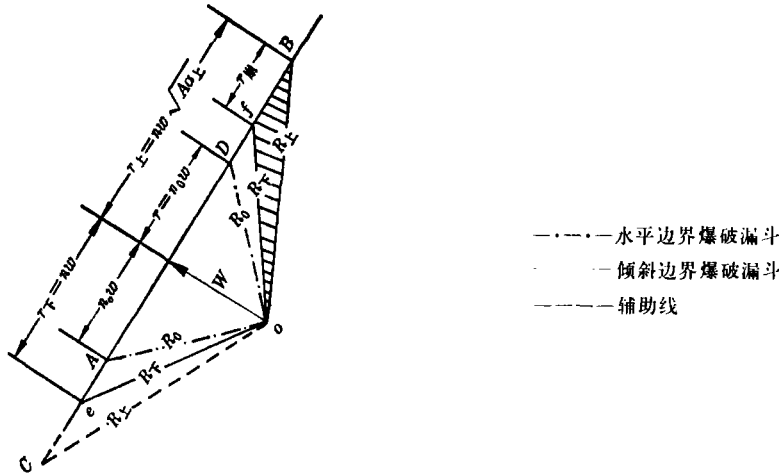


图3 倾斜边界爆破漏斗剖面计算模型图

b , 短轴为 a , 崩塌漏斗口最大宽度为 $r_{崩}$, 以 $R_{上}$ 为半径所画的的卧置圆锥体口的长轴半径为 $r_{上}$, 图3中虚线为辅助线, 阴影部分为崩塌漏斗。

1) 崩塌漏斗口最大宽度如图3

$$\therefore r_{上} = \sqrt{R_{上}^2 - w^2} = \sqrt{(nw\sqrt{A\alpha_{上}})^2 - w^2} = nw\sqrt{A\alpha_{上}} \quad (6)$$

(6)式即为倾斜地形上漏斗口半径。

$$\therefore r_{崩} = r_{上} - r_{下} = nw\sqrt{A\alpha_{上}} - nw = nw(\sqrt{A\alpha_{上}} - 1) \quad (7)$$

2) 爆破漏斗口椭圆长轴 b 、短轴 a 和长短轴之比。

$$b = r_{崩} + 2r_{下} = nw(\sqrt{A\alpha_{上}} - 1) + 2nw = nw(\sqrt{A\alpha_{上}} + 1) \quad (8)$$

$$a = 2nw \quad (9)$$

$$\frac{b}{a} = \frac{1}{2}(\sqrt{A\alpha_{上}} + 1) \quad (10)$$

在工程爆破中, 一般 $A\alpha_{上} = 1 \sim 7$, 最大到9。则 $b/a = 1 \sim 1.823$, 最大到2, 即 $b = (1 \sim 2)a$ 。

3) 由图3看出, 崩塌漏斗的体积($V_{崩}$)是以 $R_{上}$ 为半径的大圆锥体与以 $R_{下}$ 为半径的圆锥体之差的一半, 即:

$$\begin{aligned} V_{崩} &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3} \pi nw \cdot nw\sqrt{A\alpha_{上}} \cdot w - \frac{1}{3} \pi n^2 \cdot w^3 \right) \\ &= \frac{1}{2} n^2 w^3 (\sqrt{A\alpha_{上}} - 1) \end{aligned} \quad (11)$$

当 $A\alpha_{上} = 1 \sim 9$ 时, $V_{崩} = (0 \sim 1.0)n^2 w^3$, 即崩塌漏斗体积最大时, 可等于倾斜边界的抛掷漏斗体积。在岩体中最大也可达到抛掷漏斗, 或近似地认为是平地爆破漏斗的82.5%。

崩塌漏斗的面积

$$\begin{aligned}
 F_{\text{崩}} &= \frac{1}{2}(nw\sqrt{A\alpha_{\text{上}}}\cdot w - \frac{1}{2}nw^2) \\
 &= \frac{1}{2}nw^2(\sqrt{A\alpha_{\text{上}}}-1)
 \end{aligned} \quad (12)$$

4) 倾斜边界的爆破漏斗体积 ($V_{\text{崩}}$)

倾斜边界的爆破漏斗体积为抛掷漏斗体积和崩塌漏斗体积之和，即

$$\begin{aligned}
 V_{\text{崩}} &= V_{\text{抛}} + V_{\text{崩}} = n^2w^3 + \frac{1}{2}n^2w^3(\sqrt{A\alpha_{\text{上}}}-1) \\
 &= \frac{1}{2}n^2w^3(\sqrt{A\alpha_{\text{上}}}+1)
 \end{aligned} \quad (13)$$

当 $A\alpha_{\text{上}}=1\sim 9$ 时, $V_{\text{崩}}=(1\sim 1.825)n^2w^3$ 。由此看出, 在倾斜边界条件下, 由于崩塌作用, 爆破漏斗体积在同样的药量下, 比水平边界爆破漏斗几乎增大一倍。

同理, 倾斜边界爆破漏斗的面积

$$F_{\text{崩}} = nw^2 + \frac{1}{2}nw^2(\sqrt{A\alpha_{\text{上}}}-1) = \frac{1}{2}nw^2(\sqrt{A\alpha_{\text{上}}}+1) \quad (14)$$

5) 欲求平面图上药包爆炸后的破坏范围, 只需将倾斜面上爆破漏斗口的椭圆长轴 b 和短轴 a 投影到水平面上即可算出 (如图4所示)。设长轴 b 的水平投影为 $r_{\text{上下}}$, 短轴的投影为 $r_{\text{左右}}$, 则由(7)式得:

$$r_{\text{上下}} = nw(\sqrt{A\alpha_{\text{上}}}+1)\cos\alpha \quad (15)$$

$$r_{\text{左右}} = 2nw \quad (16)$$

由(15)、(16)两式看出, $r_{\text{左右}}$ 为一常数, 与地形坡度无关, 而 $r_{\text{上下}}$ 则随余弦而增减。因此, 倾斜边界爆破漏斗在平面上的水平投影, 往往与倾斜边界面上的破坏范围相反, 椭圆长轴平行于等高线, 短轴垂直于等高线。这与爆震裂缝产状和边坡稳定性有密切关系。在爆破设计时应尽量避免爆震裂缝产状对边坡稳定性的不良影响。

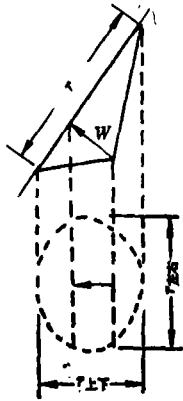


图4 倾斜边界爆破漏斗水平投影示意图

$$\begin{aligned}
 V_{\text{排}} &= \frac{1}{4}[n_1^2w_1^3(\sqrt{A_1\alpha_1}+1) + n^2w^3(\sqrt{A_N\alpha_N}+1)] \\
 &+ \frac{1}{2}\sum_1^{N-1}(F_{N-1}+F_N)\cdot a_{N-1}\cdot N
 \end{aligned} \quad (17)$$

当各个药包的参数均相等, 或采用其平均值时, 则

$$\begin{aligned}
 V_{\text{排}} &= \frac{1}{2}n^2\cdot\bar{w}^3(\sqrt{\frac{\bar{A}}{A}\cdot\frac{\bar{\alpha}}{\alpha}}+1) + \bar{F}\cdot\sum_1^{N-1}\bar{a} \\
 &= \frac{1}{2}n^2\cdot\bar{w}^3(\sqrt{\frac{\bar{A}}{A}\cdot\frac{\bar{\alpha}}{\alpha}}+1)\left(1+\frac{(N-1)\bar{a}}{n\bar{w}}\right)
 \end{aligned} \quad (18)$$

3 多层多排药包爆破漏斗体积 ($V_{\text{排,层}}$)

$$V_{\text{排,层}} = n^2\cdot\bar{w}^3\left[\frac{(N_a-1)\bar{a}}{n\cdot\bar{w}}+1\right]\cdot\left[\frac{(N_b-1)\bar{b}}{n\cdot\bar{w}}+\frac{1}{2}(\sqrt{\frac{\bar{A}}{A}\cdot\frac{\bar{\alpha}}{\alpha}}+1)\right] \quad (19)$$

式中 \bar{a} , \bar{b} 分别为排和层的平均药包间距, N_a , N_b 分别为排和层的药包个数.

3 爆破漏斗及堆积形状的观测

1) 当药量和介质不变, 仅改变地面坡度进行爆破试验时, 爆破后爆破漏斗的变化情况如图5所示, 从图5中看出, 随着地面坡度的增加, 爆破后漏斗的形状显有着的改变, 而且是

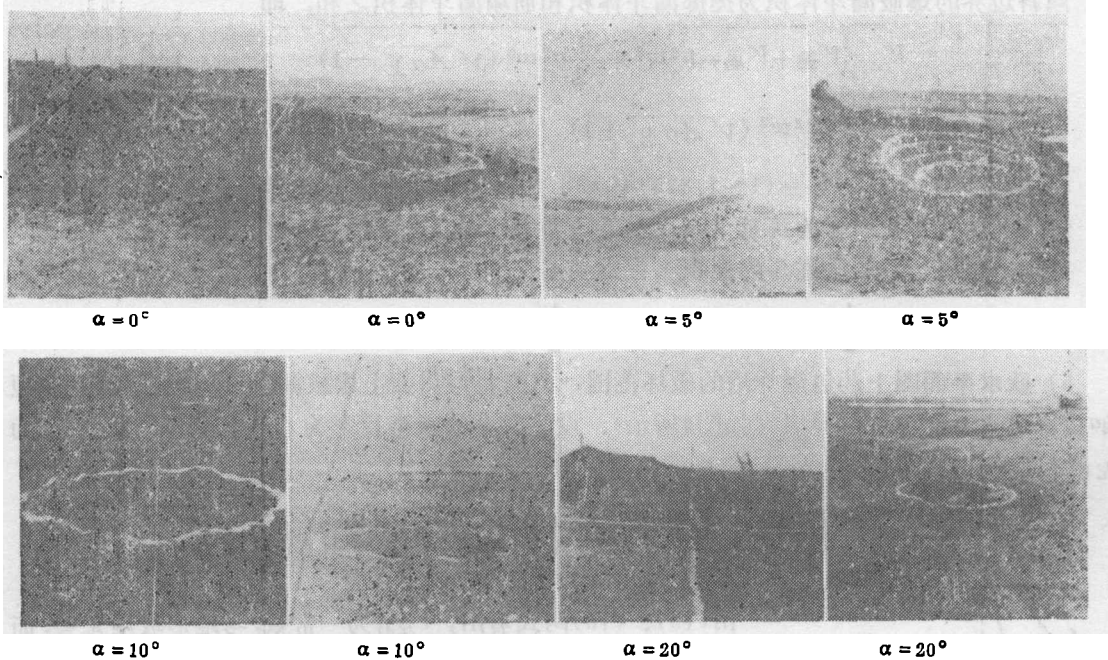
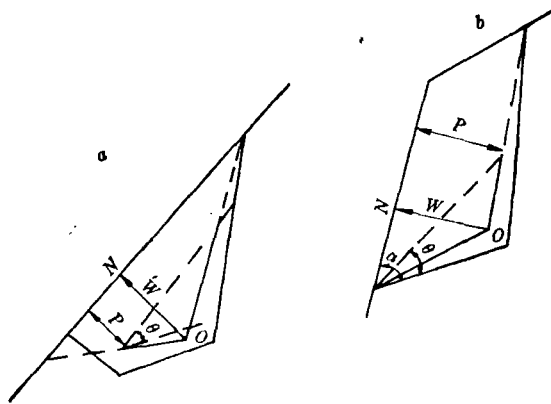


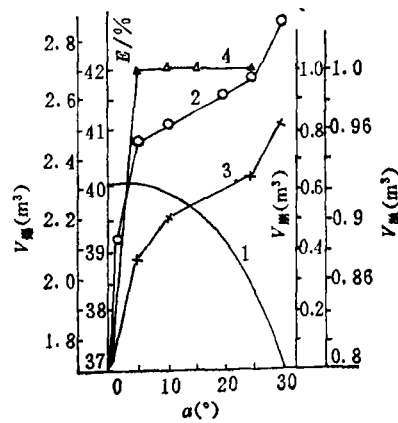
图5 $\alpha = 0 \sim 20^\circ$ 爆破前后照片

连续渐变的. 当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 抛出的介质较均匀的堆积在漏斗的边缘(白圈附近), 正中心堆积着一堆抛起又回落的小砂堆. 最大可见漏斗深度在中心砂堆与漏斗边缘之间成环型. 随着地面坡度的增加, 爆破漏斗的变化有: ①中心回落砂堆逐渐向倾斜方向移动, 至 $\alpha = 10^\circ$ 时, 回落体已移出爆破漏斗; ②抛出体已由四周均匀堆积, 并逐渐向倾斜方向集中堆积, 至 $\alpha = 20^\circ$ 时, 斜坡上方几乎已没有堆积体. 由间断曝光照片看出, 至 $\alpha = 25^\circ$ 时, 表面介质已不向山后抛出; ③在 $\alpha = 10^\circ$ 时, 已可看到, 崩塌体分成3个阶梯塌入爆破漏斗内; 至 $\alpha = 20^\circ$ 时, 已很明显, 最后顶部成陡壁, 下部按休止角堆积, 形成倾斜边界条件所特有的崩塌漏斗. 当药包性质指数 $F(E, \alpha) = 1.55$ 时, 此崩塌体全部留在爆破漏斗内, 增加了整个爆破漏斗的体积, 同时也减少了抛掷率. 若在坚硬的岩石中, 还会出现分布在堆积体表面的大块. 在含水量为7%的中砂中, 崩塌作用从 $\alpha = 5^\circ$ 时已开始; ④最大可见漏斗深度的位置也随地面坡度的增加而逐渐向倾斜方向移动, 一般在破坏作用半径 $\frac{1}{2}$ 下附近. 当 $\alpha \geq 40^\circ$ 时, 由于崩塌体的增加, 按休止角堆积已堆出下方爆破漏斗, 这样最大可见漏斗的位置则一跃由下半个漏斗内变到上半个漏斗内, 在崩塌体按休止角堆积的线与上破坏作用半径松动线相交的位置(如图6).

2) 将缓斜坡地各个坡度, 各项试验测的爆破后的有关数据平均值绘入图7, 可以看出: 爆破漏斗和崩塌漏斗体积均随坡度的增加而迅速增加, 在 $\alpha = 0^\circ \sim 5^\circ$ 之间增加较快(约增加20%), 在 $5^\circ \sim 25^\circ$ 之间增加缓慢(仅10%多一点), 从 25° 后又增加较快. 抛掷漏斗体积在



(a) $\alpha < 40^\circ$ (b) $\alpha > 40 \sim 45^\circ$
图6 最大可见漏斗深度位置随 α 而改变的示意图



1. 抛掷率；2. 爆破漏斗体积；
3. 崩塌漏斗体积；4. 抛掷漏斗体积；
图7 爆破、抛掷崩塌诸体积与抛掷率4项
爆破效果随地面坡度的变化曲线

$\alpha = 0^\circ \sim 5^\circ$ 时，同样增加了21%，而在 $\alpha = 5^\circ \sim 25^\circ$ 之间则保持不变，当 $\alpha \geq 25^\circ$ 后，又开始随地面坡度的增加而增加，这一特点将影响到缓斜坡地形的抛掷效果。

3) 在缓斜坡地形，爆破漏斗体积增加了41%，而抛掷漏斗体积只增加了27.9%，抛掷率不但没有增加，相反降低了3.1%。若抛掷作用仅限在抛掷漏斗内（不计崩塌体积），则抛掷漏斗的抛掷率由40.5%增加至52.6%。由此可知，斜坡地形崩塌漏斗量使评价工程爆破效果的抛掷率指标显著地降低。

4) 爆破每方耗药量由1kg降到0.7kg，而抛掷每方耗药量由2.41kg降至1.89kg，分别降低了30%和21.6%，即随地面坡度的变化成反比。

5) 上爆破漏斗半径随地面坡度的增加而增加。当 α 为 $15^\circ \sim 30^\circ$ 时，在中砂中共崩塌系数 $A = 0.1$ ，上下破坏作用半径的关系由(20)式表示。

$$R_{上} = (1.056 + 0.012\alpha)R_{下} \quad (20)$$

6) 倾斜边界条件爆破漏斗体积与水平边界爆破漏斗体积的关系如(21)式所示。

$$V_{爆, \alpha} = \left[\frac{1}{2} (\sqrt{A\alpha} + 1) \left(\frac{n_\alpha}{n_0} \right)^2 \right] V_{爆, \alpha=0} \quad (21)$$

式中 n_0 为 $\alpha = 0^\circ$ 时的爆破作用指数； n_α 为 $\alpha > 0^\circ$ 时的爆破作用指数。

4 小结

本文较全面地提出了在倾斜边界条件下爆破漏斗的计算模型、崩塌漏斗的体积、面积及爆破漏斗体积和面积的计算公式；一层和多层多排爆破漏斗的体积公式；倾斜边界与水平边界爆破漏斗体积的相关公式；倾斜边界爆破作用指数的经验公式，以及可见爆破漏斗的型状与缓斜坡地形爆破效果随地面坡度的变化规律。以上这些设计参数具有较大的实用意义^[2,3]，可供生产中使用。

参 考 文 献

1 王鸿渠，多边界条件下破坏作用半径的计算公式。爆破，1989

- 2 方左英主编. 路基工程. 北京: 人民交通出版社, 1987
- 3 王鸿渠. 崩塌作用对工程爆破效果影响的研究. 北京工业大学学报, 1990, 16(1): 35~43

Study on the Characteristics of Explosion Crater Under Inclined Boundary Conditions

Wang Hongqu

(Department of Civil Engineering)

【Abstract】 Large amount of engineering practice under the inclined boundary conditions revealed the characteristics of explosion crater in slope topography. The volume and area calculating formulas of explosion crater were reached after simple geometric inference. The law of blasting effect on gentle slope topography is obtained by test, which varies with the inclination of slope.

Key Words: inclined boundary condition, crumble crater, blasting action radius, index of multi-boundary condition effect, ellipse cone lain down