

定向爆破抛距计算方法

朱忠节

(1983年9月13日收到)

本文根据我国定向爆破工程技术资料,认为应用抛掷初速度及弹道理论来计算抛距时,必须考虑空气阻力的作用,提出一套定向爆破抛距计算公式。文中进行了工程实例的验算,比较接近实际。本计算方法更能适用于大药包抛距计算。

爆破介质抛掷规律的计算,国内外都进行过大量工作。五十年代,苏联Г. N. 波克罗夫斯基应用弹道理论于爆破抛掷计算⁽¹⁾,提出以下几点假定:

1. 假定土壤与岩石为非弹性介质,将爆破漏斗分成若干辐射角锥体,每一角锥体在爆破中获得同样的运动量。

2. 每个角锥体单元岩体抛掷初速度 V_0 和药包中心通过重心至地面的半径 R 的三次方成反比,和有效抛掷能量平方根成正比。得出:

$$V_0 = \frac{A}{R^3} \quad (1)$$

其中

$$A = \sqrt{\frac{2\zeta v Q}{\int \frac{dm}{R^b}}} \quad (2)$$

式中, Q 为炸药重量; v 为炸药单位重量的能量; ζ 为炸药抛掷能量有效利用系数; dm 为角锥抛掷体的微分量。

3. 根据弹道方程式,不计空气阻力的条件下,抛距为 x , h 为药包中心至地面的高差, θ 为抛射角, g 为重力加速度时,角锥体单元轨迹方程式为

$$x = \frac{V_0^2}{g} \left(1 \pm \sqrt{1 + \frac{2gh}{V_0^2 \sin 2\theta}} \right) \sin \theta \cos \theta \quad (3)$$

4. 抛掷速度方向为角锥体重心与药包中心的连线方向。

1959~1960年,我国的一些定向爆破工程曾应用上述弹道理论,进行过抛掷堆积计算,但计算繁杂且与实际相差太大。以后我国许多科技人员,曾对其中的 A 和 ζ 值作过标定,并对空气是否有阻力,它的影响大小,抛射角是否成辐射方向等问题,都作过一些探讨。结果

很难跳出以上几个计算式的范围。

在此期间,我们提出了一套体积平衡抛掷堆积计算方法,在国内工程实践中广泛应用,许多爆破科技人员,不断把它充实完善,初步解决了这个问题。但由于其中的抛距计算公式的应用范围有一定局限性,我国的定向爆破工程的最小抵抗线 W 值大多在40米以内,所以计算的误差较小。对于解决 $W > 50$ 米的情况,计算可能往往偏大。因此,抛距的计算,成为当前大药包定向爆破需要解决的技术问题之一。

我们在参阅国外爆破技术资料的基础上,收集和分析了我国大量的定向爆破工程资料和一些抛距试验数据资料,确定了有关抛速系数,提出了一套考虑空气阻力系数,应用抛掷初速度和弹道理论原理,来计算抛距 x 的理论轨迹方程式。

一、空气阻力系数 b

我们认为:空气阻力系数 b 在岩体抛掷范围内与土岩的容重 γ (公斤/米³)成反比,且与药包的最小抵抗线 W (米)有关,这个结论是比较正确的。我们按土质和岩石分别考虑, b 的近似关系式为

$$\text{土质} \quad b = \frac{130}{\gamma(W)^{2/3}} \quad (4)$$

$$\text{岩石} \quad b = \frac{180}{\gamma(W)^{2/3}} \quad (5)$$

二、抛掷初速度 V_0

过去根据公式 $V_0 = A/R^j$ 来计算抛掷初速度,标定 A 值是比较困难的。我们从爆破工程的实践认为,把爆破漏斗分成若干小的辐射角锥体的办法过于繁琐,用于工程计算也是不必要的,应该将整个爆破漏斗视为整个抛体,要求土壤岩石抛体的初速度完全从理论上来解决,由于影响因素比较复杂,看来是困难的。因此,要通过工程实践和抛距试验数据来解决。首先取抛掷初速度 V_0 与药包的最小抵抗线 W (米)的平方根成正比,体积平衡法的抛距计算公式也说明这点。其次,它与计算抛掷标准漏斗的参数单位耗药量 K (公斤/米³)、 n 值、及爆破作用指数的函数 $f(n)$ 有关。其基本形式为

$$V_0 = B\sqrt{W} [1 + A\sqrt{Kf(n)}]^\alpha \text{(米/秒)} \quad (6)$$

式中系数 α 、 B 及 A 值的确定说明如下:

1. 由三十几个药包的数据分析,应用数理统计及最小二乘方法解出 $\alpha = 2.08$ 。对特殊的大药包计算初速度时,可应用 $\alpha = 2.08$;对于一般情况为计算方便,取 $\alpha = 2.0$ 。

2. B 值与土岩的容重成正比。如果以2号岩石炸药为标准,当介质为土质时,取 $A = 0.9$,则

$$B = \frac{\gamma}{850} \quad (7)$$

当介质为岩石时,一般情况, $A = 0.9$,则

$$B = \frac{\gamma}{830} \quad (8)$$

对于多层群药包同时起爆时,考虑共同作用,一般取 $A = 1.0$;当 $W > 50$ 米时,也取其 $A = 1.0$;当 $W = 10 \sim 50$ 米时, $A = 0.9$;当 $W < 10$ 米时, $A = 0.70 \sim 0.75$ 。

三、抛距理论计算中引用的运动轨迹方程式

如图一所示。横坐标为 x ,纵坐标为 y 。设质点为 M , θ 为质点速度 V 同 x 轴的夹角。

因为速度 V 的方向和运动轨迹的切线方向一致,则 θ 角沿轨迹为

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \theta$$

用 u 来表示速度 V 在 x 轴上的投影

$$u = V \cos \theta$$

又速度 u 为

$$\frac{dx}{dt} = u$$

质点 M 同时受到两个加速度的作用,一个是空气阻力作用产生的加速度 j 。如果质点的运动速度小于空气中的声速,空气阻力将与速度 V 的平方成正比。若空气阻力系数为 b 时,则空气阻力所产生的加速度 j 为

$$j = bV^2$$

空气阻力加速度的方向与速度方向相反,从力学中知道,总加速度等于速度投影 u 对时间 t 的导数。因此在 x 轴上的投影为

$$\frac{du}{dt} = -j \cos \theta$$

另一个为重力加速度 g ,方向是垂直向下的。同理,将两个加速度投影在轨迹的法线上,便得到向心加速度的值。方程中只含重力加速度的投影,因此得

$$\frac{V^2}{R} = g \cos \theta$$

其中, R 为轨迹曲率半径

$$\frac{dS}{d\theta} = -R$$

必须考虑所通过的路程 S 的长度和运动速度 V 之间的联系。已知方程为

$$\frac{dS}{dt} = V$$

以上8个方程含有9个变量,即 t 、 x 、 y 、 S 、 θ 、 u 、 V 、 j 、 R 。可利用6个方程消去7个变量后,得一个三阶常微分方程

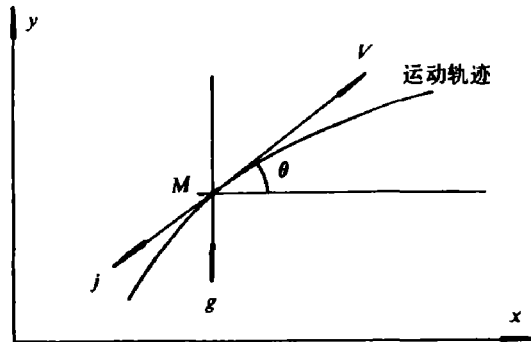


图1 质点 M 的运动轨迹

$$\frac{d^3y}{dx^3} = 2b \frac{d^2y}{dx^2} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2}$$

解方程求得的轨迹方程式为

$$\frac{bV_0^2}{g} \sin 2\theta = \frac{\exp(2bx) - 2bx - 1}{2bx} \quad (9)$$

式中 x 为药包中心至堆积体边缘的水平距离, 即简称抛距 (米)。

四、运动轨迹方程式的合适求解

轨迹方程(a)右边的 e^{2bx} 可以展开成为一个无限级数, 即

$$\exp(2bx) = 1 + \frac{2bx}{1} + \frac{(2bx)^2}{2!} + \frac{(2bx)^3}{3!} + \frac{(2bx)^4}{4!} + \dots$$

当 $2bx$ 的绝对值甚小, 在 $0.1 \sim 0.01$ 以下, 或者在真空的条件下, 则级数可以取前三项, 因此公式变成

$$\frac{bV_0^2}{g} \sin 2\theta = \frac{1 + 2bx + [4b^2x^2 / (1 \times 2)] - 2bx - 1}{2bx}$$

移项整理得

$$x_{z,k} = (V_0^2 / g) \sin 2\theta \quad (10)$$

式中 $x_{z,k}$ 为在真空中的抛距。为了求解方程式(a), 列出一个辅助量 λ , 而 λ 为 $2bx$ 的函数, 也是空气阻力系数 b 与在真空中的抛距 $x_{z,k}$ 的乘积, 因此得

$$\lambda = bx_{z,k} = \frac{\exp(2bx) - 2bx - 1}{2bx} \quad (11)$$

为求解方便起见, 特别制定了考虑空气阻力系数时的 $2bx$ 与 λ 值的对应关系, 详情见表一。

解答方程式中的 $2bx$ 值时, 可以查表一, 已知 λ 值时, 表中就有 $2bx$ 的对应值。它是一个近似值解法。当 λ 值是在表中的两值之间时, 可以应用插入法来计算 $2bx$ 的数值。由 $2bx$ 值就可以再求抛距 x 的数值。

五、计算抛距的程序

1. 由已知土石的容重 γ 及药包的 W , 应用公式(4)或(5)计算空气阻力系数 b 。
2. 由已知药包的 W 、 n 、 $f(n)$ 及 K 值, 根据土壤岩石 γ 与药包情况, 选取系数 B 及 A 值, 应用公式(6)计算抛掷初速度 V_0 值。

在验算时, 应以实装炸药量 Q (公斤) 为准, 可以反算 $K f(n)$ 的实际值。因为 $Q = KW \cdot f(n)$, 则

$$K f(n) = Q / W \quad (12)$$

3. 根据初速度 V_0 及重力加速度 g , 视地形情况, 把爆破漏斗作为整个抛体, 其最小抵抗线 W 方向为初速度方向, 可以求得抛射角 θ 值。由公式(10)计算真空中的抛距 $x_{z,k}$, 或者直接求得 $\lambda = bx_{z,k}$ 值。

4. 已知 λ 值, 由表一查得

表 1 抛距方程式中 $2bx$ 与 λ 的对应值

$2bx$	λ	$2bx$	λ	$2bx$	λ	$2bx$	λ	$2bx$	λ	$2bx$	λ
0.00	0.0000	2.0	2.1946	3.6	8.8883	5.2	33.6673	6.8	130.9191	8.6	630.4151
0.20	0.1070	2.1	2.4325	3.7	9.6614	5.3	36.6113	6.9	142.6800	9.0	899.2311
0.40	0.2295	2.2	2.6477	3.8	10.5003	5.4	39.8670	7.0	155.5143	9.5	1405.20
0.50	0.2974	2.3	2.9018	3.9	11.4107	5.5	43.3073	7.1	169.5493	10.0	2202
0.60	0.3668	2.4	3.1854	4.0	12.3895	5.6	47.1175	7.2	184.8889	10.5	3458
0.80	0.5319	2.5	3.4728	4.1	13.4743	5.7	51.2579	7.3	201.6438	11.0	5442
1.00	0.7183	2.6	3.7938	4.2	14.6395	5.8	55.7758	7.4	233.4394	11.5	8584
1.1	0.8220	2.7	4.1408	4.3	15.9070	5.9	60.7017	7.5	239.9400	12.0	13560
1.2	0.9334	2.8	4.5161	4.4	17.2843	6.0	66.0717	7.6	261.7895	12.5	21460
1.3	1.0533	2.9	4.9220	4.5	18.7816	6.1	71.9282	7.7	285.6623	13.0	34030
1.4	1.1823	3.0	5.3620	4.6	20.4096	6.2	78.3145	7.8	311.7692	13.5	54030
1.5	1.3211	3.1	5.8381	4.7	22.1809	6.3	85.2810	7.9	340.3038	14.0	85860
1.6	1.4710	3.2	6.3634	4.8	24.1063	6.4	92.8813	8.0	371.4938	14.5	136800
1.7	1.6323	3.3	6.9130	4.9	26.2020	6.5	101.1800	8.2	491.6707	15.0	217900
1.8	1.8053	3.4	7.5188	5.0	28.4820	6.6	110.2273	8.4	528.2857	15.5	347700
1.9	1.9923	3.5	8.1757	5.1	30.8863	6.7	120.1045	8.5	577.0941	16.0	555380

$$2bx = c \quad (13)$$

5. 由(13)式求得抛距

$$x = \frac{c}{2b} \text{ (米)} \quad (14)$$

根据统计规律, 已知抛距 x 与由药包中心至堆积体重心的距离 x' 的比为 $x/x' \approx 1.6$, 故

$$x' = x/1.6 \quad (15)$$

六、抛距的修正值

1. 多排药包的抛距修正系数 $(1 - E_1)$

利用天然地形布设单排药包爆破, 应用本文公式计算抛距比较接近实际。但当有多排药包布设时, 后排主药包的抛距受到前排辅助药包的影响。其影响程度为 E_1 , 关系式如下

$$E_1 = \frac{W_1}{3nW_2 \sin \varphi} \quad (16)$$

式中: W_1 及 W_2 分别为前排和后排药包的最小抵抗线(米); φ 为地面坡度角(度); n 为主药包的爆破作用指数。

计算的抛距 x 应乘以系数 $(1 - E_1)$, 即为后排主药包的抛距。

2. 炸药对抛距影响的系数 e

抛距公式均以 2 号岩石炸药为标准, 如果使用其它炸药时, 计算的抛距 x 应乘以炸药系数 e , 后, 即为接近实际的抛距, 其 e 的关系式为

$$e = \frac{\sqrt{V_k}}{65} + \sqrt[3]{e} - 1 \quad (17)$$

式中的 e 为其它炸药换算为 2 号岩石炸药的换算系数, V_k 为炸药的爆速(米/秒)。如果计算抛掷初速度时, 应用公式(12), 将实装的药量 Q 求出 $K f(n)$ 值时, 就不必考虑炸药换算系数 e 值, 直接计算 e 值。

$$e = \sqrt{V_k} / 65 \quad (18)$$

一般情况下, 铵油炸药的 $e = 0.85$, 如果制作工艺粗糙(野外加工), 爆速低, 应按上式求 e 。

七、与体积平衡法的抛距比较^[2]

体积平衡法的抛距公式是根据工程上 36 个药包量 Q 与实测抛距 x , 应用数理统计方法分析推导得来的, 其式为

$$x = \frac{v}{790} W \sqrt[3]{K f(n)} (1 + \sin 2\theta) \quad (19)$$

两种方法的一些系数都来自工程实践。在一定药量药包的范围内, 例如 $W = 40$ 米以内, 两种计算都比较接近实际。但是超出这个范围, 则两种计算的差别较大。因为抛距法计算中, 运动轨迹方程考虑了空气阻力, 药包越大, 其运动速度越大, 空气阻力的影响就越大。所以

在大药包的条件下,应考虑采用抛距法计算为宜。

此外,在定向爆破抛掷堆积计算中,还有其他一系列内容,则参照体积平衡法进行,此处不再赘述。

八、计 算 实 例

为说明上述公式的应用,举四种情况验算如下:

1. 娄邵铁路洪山殿车站定向爆破,其中1号药包为: $W = 13.3$ 米, $n = 1.5$, $K = 1.3$; 实装2号岩石炸药量 $Q = 7.15$ 吨;地质为石灰质砂页岩,容重 $\gamma = 2300$ 公斤/米³;根据地形测得抛射角 θ 为 24.5° 。该处爆后实测距 $x_{\text{实}} = 100$ 米。按一般情况验算抛距 x 值。

(1) 按抛距法计算

由(12)式得 $K f(n) = 3.039$ 。取 $A = 0.9$,由(8)式得 $B = 2.771$ 。由(5)式得 $b = 0.01394$ 。取 $\alpha = 2$,由(6)式得 $V_0 = 66.689$ 米/秒。根据(10)式求得 $\lambda = b x_{\text{实}} = 4.7695$ 。查表一,进而求出 $x = 102.67$ 米,误差为 $+2.67\%$ 。

(2) 按体积平衡法抛距公式(19)验算得 $x = 98.4$ 米,误差为 -1.6% 。

2. 贵昆铁路马嘎车站定向爆破,岩石为石灰岩, $\gamma = 2500$ 公斤/米³,原地面坡度 30° ;前排3个辅助药包, $W = 12$ 米, $n = 1.25$ 。后排两个主药包,1号药包 $W = 20$ 米, $n = 1.5$ 。抛射角 θ 为 23° , $K = 1.5$,实装2号岩石炸药。爆破后在1号药包断面处实测抛距 $x_{\text{实}} = 124$ 米。试进行验算抛距。

(1) 因为药包是按前后排布置,所以抛距计算中需要乘以修正系数。

$[1 - E_i] = 0.7334$, $K f(n) = 3.645$ 。空气阻力系数 $b = 0.00977$ 。取 $\alpha = 2$,初速度 $V_0 = 99.53$ 米/秒。 $\lambda = b x_{\text{实}} = 7.0965$,查表1进而解出 $\chi = 170.4$ 米。后排主药包抛距用 $[1 - E_i]$ 值进行修正得 $\chi = 125$ 米,计算误差为 $+0.8\%$ 。

(2) 按体积平衡法抛距公式(19)验算得 $\chi = 122.8$ 米,计算误差为 -0.96% 。

(3) 陕西陇县甘峪沟定向爆破,该处为黄土, $\gamma = 1600$ 公斤/米³,岸坡 68° ,抛射角 $\theta = 32^\circ$ 。一个药包, $W = 13$ 米。实装铵油炸药4000公斤。爆破后实测的抛距 $\chi_{\text{边}} = 51$ 米, $\chi'_{\text{重心}} = 31$ 米。试进行验算抛距。

假定铵油炸药爆速 $V_k = 3000$ 米/秒计,则由公式(18)得到 $e_i = 0.842$ 。

(1) 按抛距法计算

此处, $K f(n) = 1.82$,由公式(4)得 $b = 0.014695$ 。取 $A = 1$, $\alpha = 2$,由(6)、(7)式得 $V_0 = 37.4488$ 米/秒。则 $\lambda = b x_{\text{实}} = 1.8882$ 。查表1进而解出 $\chi = 52.8$ 米,计算误差为 $+3.5\%$ 。由(15)式得 $\chi' = 33$ 米,误差为 6.4% 。

(2) 按体积平衡法抛距公式(19)验算得 $\chi = 51.4$ 米,计算误差为 $+0.8\%$,重心距离 $\chi' = 51.4/1.6 = 32.1$ 米,比实测大 3.5% 。

4. 根据苏联捷尔尼哥夫斯基的资料^[3],苏联一处大药包,其 $W = 60.5$ 米,装药量 $Q = 1647$ 吨,岩石容重 $\gamma = 2900$ 公斤/米³,地形坡度平均为 35° ,爆破后实测堆积范围边缘距离药包中心 $\chi_{\text{边}} = 760$ 米。

(1) 捷尔尼哥夫斯基应用他的抛速公式进行验算时, $\chi_{\text{边}} = 550$ 米,比实际小 27.6% 。

(2) 应用体积平衡法抛距公式(19)验算

此处, $K f(n) = 7.4375$, $x = 841$ 米, 计算比实际大10.6%。

(3) 应用抛距法计算

空气阻力系数 $b = 0.0040275$, 取 $A = 1.0$ 。因为大药包, 取 $\alpha = 2.08$, 则 $V_0 = 419.4$ 米/秒, $\lambda = b x_{\dots} = 67.8598$, 查表一进而求出 $x = 748.7$ 米。计算比实际小1.48%。因此用抛距法进行计算, 对于大药包是比较适合的。

参 考 文 献

- (1) 波克罗夫斯基, Г. Н. 等著(治淮委员会勘测设计院翻译), 用定向爆破法筑坝的理论与实践, 水利出版社 (1957年3月)。
- (2) 冯叔瑜、朱忠节、马乃耀, “体积平衡法——定向爆破抛掷堆积计算”, 土岩爆破论文集, 冶金工业出版社 (1980年11月第一版)。
- (3) 捷尔尼哥夫斯基, Я. Я., “论抛掷爆破石块飞散”, 大爆破汇编(第一集), 中国科学技术情报研究所编辑及出版, PP. 246—256。

COMPUTATIONAL METHODS FOR THE THROWING DISTANCE OF DIRECTION CONTROL BLASTING

Zhu Zhongjie

Abstract

According to the technological documents of direction control blasting in our country, it is necessary to consider the action of air resistance in the computation for the throwing distance by applying the initial throwing velocity and projectile theory. This paper presents a computational method taking account of this action. The results of computation and engineering illustrations are compared and show that the present method is more applicable for large amount of explosives.