

实验研究砂砾石中平 地定向抛掷的堆积问题

许连坡

(1984年8月30日收到)

在砂砾石中进行的平地定向爆破实验得到了较为集中的堆积体。本文总结了堆积体的形状,得到集中堆积区为正态分布;并分析了这一结果的形成机理和最小抵抗线改变时堆积体的变化特征。

一、问题的提法

众所周知,定向爆破的关键问题是抛掷堆积问题。在这里,人们希望建立起堆积体的位置和形状与药包布置和装药量之间的关系。对一次爆破,如果人们只关心堆积体和爆坑(一般称为爆破漏斗)的话,则问题的提法可表述如下:

由于当前的爆破规模是不能和地球的曲率半径相比的,因而我们可以在地面上建立直角坐标系。 z 轴铅直向上,表示高程, x, y 为互相垂直的水平坐标轴,则原地形可表示为

$$z = \varphi(x, y) \quad (1)$$

函数 φ 可以发生跳跃(如陡坡),也可以出现多值(对岩洞)。爆后地形为

$$z = f(x, y, x_i, y_i, z_i, r_i, t_i, \varphi, \text{介质性质参数, 炸药性质参数, 其他参数}) \quad (2)$$

这里 x_i, y_i 和 z_i 为第 i 个药包的中心坐标; r_i 为第 i 个药包的装药半径, t_i 为第 i 个药包的起爆时间,而 $i = 1, 2, 3, 4, \dots, k$ 。地形变化为

$$\Delta z = f - \varphi \quad (3)$$

由于 φ 已知,我们的问题就是寻找函数 f 或 $f - \varphi$ 的形式。显然,这不是一项轻松的工作。

事实上,对参数不做任何限制地去寻找 f 或 $f - \varphi$,即使不是不可能的,也是不必要的。人们进行定向爆破工作是有目的的。对爆区的地形地质条件,药包布置,起爆时间,装药量及炸药性能都有严格的限制和要求。这样就使问题大为简化。

对于抛掷堆积问题,从1959年的函数变换理论⁽¹⁾到六十年代的体积平衡法⁽²⁾和七十年代提出的弹道法⁽³⁾及其它工作^(4,5)我国爆破工作者做了大量工作。目前我国的定向爆破技术在

经济技术指标达到了相当高的水平。但在理论上还远远不能令人满意。

二、实验情况

实验情况如文献〔6〕,是在西北某戈壁滩上进行的。地形平坦,介质为砂砾石。没有统计其粒径组成,但其中几毫米到几厘米粒径的砂粒均有。

我们实验研究的是二维问题,即 φ 和 f 中只有一个坐标 x , 而和 y 无关。这样,原地形便可写成

$$z = \varphi(x) \quad (4)$$

我们在平地上预先人工开挖出三角形的沟,如图 1 的 $\triangle EDO$ 。为了方便,我们把 x 的零点取在 O 点,这样, G 的坐标即为 $(-1.54w, 0)$, D 的坐标为 $(-1.54w, -1.54w)$, E 的坐标为 $(-3.08w, 0)$,于是原地形可写成

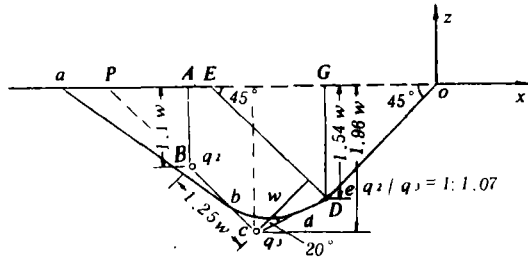


图 1 药包布置和爆破坑图。 w 为最小抵抗线

$$\varphi(x) = 0, \quad x \geq 0 \quad (5)$$

$$\varphi(x) = \begin{cases} x, & -1.54w < x < 0 \\ -3.08w - x, & -3.08w < x < -1.54w \end{cases} \quad (6)$$

$$\varphi(x) = 0, \quad -\infty < x < -3.08w \quad (7)$$

工程上一般不能给出 $\varphi(x, y)$ 的表达式, 而用等高线来表示。

对于函数 f , 如前述, 我们只需找到最优爆破方案下的表达式即可。通过大量的实验, 我们认为图 1 所给的爆破方案⁽⁶⁾是较好的。因此, 问题就是找到这个方案或接近这个方案下的函数 f 。由于函数 φ 中只有 w 可变, 故函数 f 中的 x_i, z_i 等只能和 w 大致成比例地变化。自然, r_2/r_3 的变化也不能大。既然爆破方案大体已确定, 则 x_i, z_i 的比值也不应有大的改变。由于我们做的单排齐爆实验, 根据爆破规模和雷管的起爆时差, 可以认为 $t_i = 0$ 。

实验中还改变了炸药品种和介质的含水量, 这主要是为了研究它们对抛距的影响。

图 1 所给方案下的爆破结果, 已在文献〔6〕中给出。有两个堆积集中区。一个在爆坑的边上, 即 O 点附近, 这里堆积的方量很少。另一个在中心抛距 L_e 附近, 该处堆积方量较多。两个集中堆积区之间的方量也很少。文献〔6〕的关系式(1~12)可以给出这种堆积特征。为了使用方便, 我们把它用本文规定的附号写出

$$z = \frac{a - b\xi_0 + (b/a)\ln[1 - (x/L_M)^{1/2}]}{2a(x/L_M)^{1/2}[1 - (x/L_M)^{1/2}]} \cdot \frac{w^2}{L_M} \quad (8)$$

其中, $\xi_0 = 0.05, a = 21, a = 3.64, b = 3.30$, 而 $L_M \approx L_e$ 。它们均随比药量的增加而线性地增加。 x 的变化范围是

$$\xi_0 < \xi_0 - (1/a)\ln[1 - (x/L_M)^{1/2}] < 1 \quad (9)$$

在这一结果中, 我们是根据埋块给出的等抛距线图来求出抛掷速度, 进而再求得堆积厚度的。但是等抛距线⁽⁶⁾只是在药包的近区才有, 另外还有一半的面积中等抛距线不能给出。这后一区中埋块抛距相差不大, 分布无规律, 实际上这就是堆积集中区的介质。对于该区我

们是用外推法处理的, 并指出该区的堆积是要产生滑塌的。

对于砂砾石中的实验爆破, 在较好的方案下, 堆积体集中性良好。除爆破坑边上有少量的堆积方量外, L_c 附近的集中区十分明显, 两个集中区之间几乎看不到有介质堆积。因此, 我们直接测量了不同距离处的堆积方量。方法是在堆积区的地面上铺以橡皮板, 爆后收起土方, 测出方量, 便得到不同距离处的堆积方量, 进而再算出堆积厚度。

三、堆积规律

1. 堆积区的特征尺寸

我们首先研究主要集中区。该区中心到 o 点的距离 (即其坐标) 为 L_c , 这样, 我们便先研究函数 f 在 L_c 附近的情况。由于抛掷体中有一半以上的方量抛到该处。根据质量守恒关系, 堆积体的特征尺寸应和最小抵抗线 w 有关。实测给出这一关系如图 2 和图 3。图 2 是堆积高度和 w 的关系, 我们看到堆积高度和 w 成正比。图 3 是堆积体的宽度和 w 的关系, 也有类似

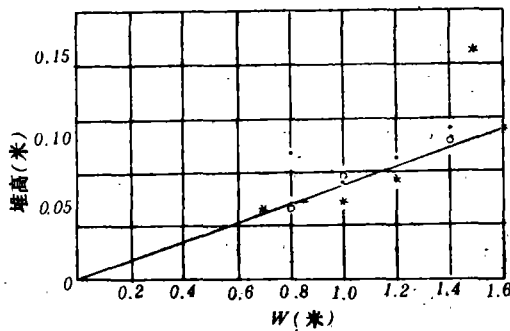


图 2 堆积高度和 w 的关系

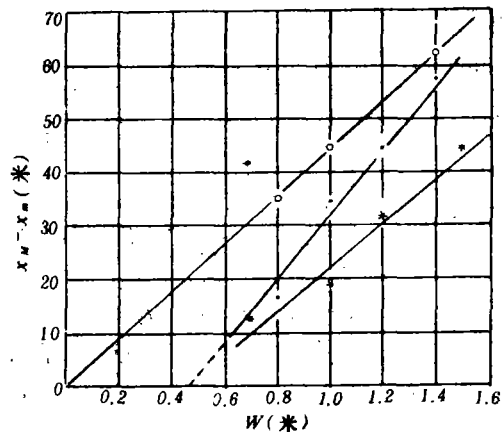


图 3 堆积体的宽度和 w 的关系

的结果, 两者成正比。但这里和图 2 不同, “*”点和“·”点的直线外推时不通过零点。这是由两个因素造成的。一是所谓堆积宽度有时是不大好量的, 特别 w 小时方量少而 L_c 又比较大, 散失的方量较多。二是集中区外尚有一定的方量, 当 w 改变时其影响可能发生变化 (详后)。

图 2 和图 3 所显示的规律非常重要。它表明堆积体形状是满足几何相似律的: 其特征尺寸和 w 成正比。

2. 抛距的影响

如前述, 影响堆积形状的除 w 外, 尚需考虑抛距 L_c 的作用。当 $w = 1$ 米时所得结果如图 4。它的横坐标是由堆积体测得的 L_c , 纵坐标是各特征抛距。由直线 2 和 3 我们看到, 埋块所测得的抛距 L_c (埋块) 比堆积体测得的抛距 L_c 远五米左右, 此值和 L_c 大小无关, 这一差别并不大。由直线 1 和 2 我们看到, 堆积体的后边界 x_m 和 L_c 也差一个常数值, 它为 15 米左右, 也和 L_c 无关。由直线 4 我们看到堆积体的前边界 x_m 到 L_c 的距离则随 L_c 的增加而增加, 但变化缓慢。当 L_c 由 30 米增加到 125 米时, $x_m - L_c$ 由 18 米增加到 37 米。这一结果表明: 介质落地时其速度的大小和方向对堆积体的特征是有影响的, 它造成介质落地时的前冲现象。 L_c 越大, 前冲也越大, 这是自然的。但实测堆积形状表明: 这一前冲作用引起的堆积体向前扩展的部分,

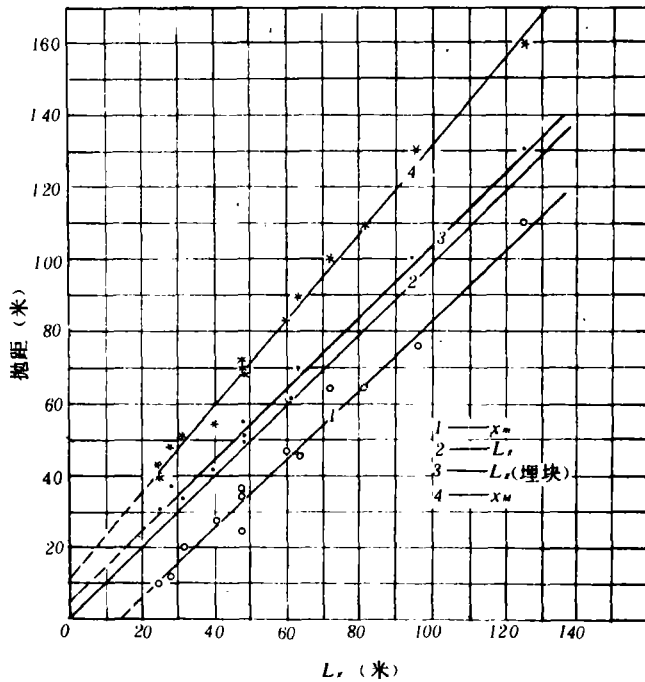


图4 抛距对堆积体的影响

其堆积厚度很小, 方量也不大, 主要堆积范围则是对 L_s 对称的。这一结论中包含炸药品种和介质含水量改变时的影响。

3. 堆积形状

L_s 是集中堆积区的中心, 它前后的介质的量是相等的。

由于堆积体的特征尺寸和 w 成正比, 因而对不同规模的爆破堆积体, 可以利用此原则化为同一规模的几何相似的堆积体。

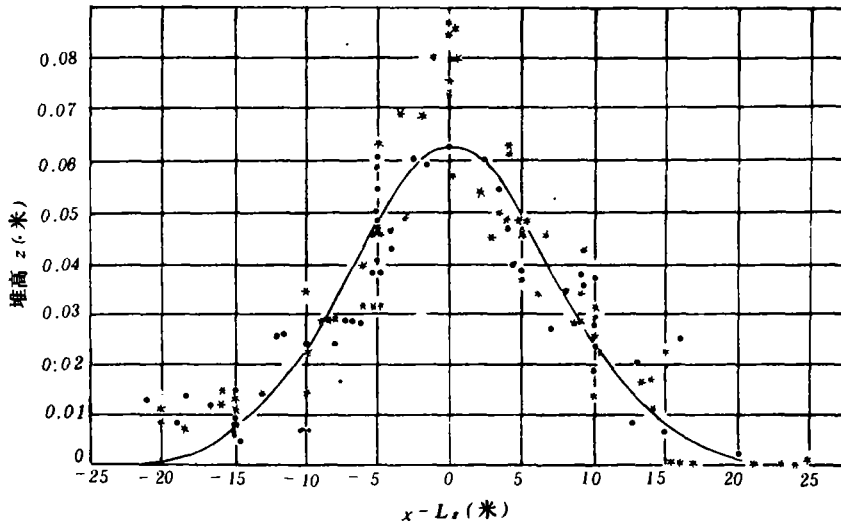
由于 L_s 对堆积范围影响不大, 对堆积方量影响也不大, 因而我们可以忽略它的影响而把不同 L_s 的堆积体的实测资料综合使用。图5就是按此原则处理图1方案和接近此方案的各次实验所得资料而得到的。图上的0点即为地面的 L_s 位置。

我们看到:(1)从统计上看, 堆积体形状的主要部分对 L_s 是对称的。(2)堆积体的前后端部有一定差别, 这主要是介质落地时的前冲造成的。但也可看出前冲对堆积形状的影响不大。(3)堆积的形状可用误差曲线或三角形来近似。我们这里取误差曲线, 则得

$$z = Ae^{-\eta^2/\delta^2} \quad (\eta = x - L_s) \tag{10}$$

由图5可得 $A = 0.063$ 米, $\delta = 10$ 米。从理论上来说, A 和 δ 应通过质量守恒关系和抛掷方量相联系。实际上(10)式曲线下的面积应为抛掷体的一部分, 即有

$$\int Ae^{-\eta^2/\delta^2} d\eta = \lambda S \tag{11}$$

图5 L_r 附近的堆积形状

这里 S 为抛掷体断面面积, λ 为小于 1 的数, 它表示在 L_r 处的堆积体对总抛掷体的比例。完成 (12) 式的积分得

$$A\delta\sqrt{\pi} = \lambda S \quad (12)$$

由图 1 得 $S = 2.0 \text{米}^2$, 于是 (12) 式给出 $\lambda = 0.55$ 。这样, L_r 附近的堆积体形状便给出如 (10) 式。

对爆坑边上的堆积区, 尽管 (8) 式在 $x = 0$ 时是奇点, 但其堆积方量却很少, 因而它无多大影响, 我们不再分析。

至此我们得到函数 f 在 L_r 附近的形式为

$$\left. \begin{aligned} z &= A \exp\left[-\frac{(x-L_r)^2}{\delta^2}\right] \\ A &= 0.063w \\ \delta &= 10w \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

它通过 L_r 联系于比药量 Q/V , 其布药方案如图 1。此区之外, (8) 式可用。

四、爆破坑

为了完整性, 尚需给出 $x < 0$ 时 f 的情况。这主要是爆破坑的形状。爆后测得爆破坑的形状如图 1 的曲线 $abdeo$ 。其特点如下: (1) $-1.54w \leq x < 0$ 时, 地形基本无变化, 即 $f = \varphi$ 。(2) 该曲线的 edb 段是一小段曲线, 它表示爆破坑底的变化情况。(3) 该曲线的 ba 段基本为直线, 但坡度已不是 45° , 而是 36° 左右。我们不再写出这一曲线的解析表达式, 即函数 f 的具体形式。

非常重要。可见爆破坑的形状和比药量关系不大。其 ab 段基本是爆破过程中形成的, 未见回落和滑坡现象。药包位置上的砂砾石被炸碎, 呈灰白色粉末; 有时它还可形成一个小的隆起。显然, 这是爆破过程中形成的。

爆破坑后边有少量的堆积方量。它是由图1的 $\triangle ABa$ 反抛形成的。对此, 我们未做研究。

五、分析讨论

1. 堆积方量问题

由图5我们看到, L_s 附近的堆积宽度为 $40w$ 左右; 它的范围是自 L_s 向前 $20w$, 向后 $20w$ 。我们再积分(8)式, 可得坐标 x 以前的堆积断面面积为

$$S(x) = -\frac{w^2}{a} \left\{ (a - b \xi_0) \ln \left(1 - \frac{x^{1/2}}{L_s^{1/2}} \right) + \frac{b}{2a} \left[\ln \left(1 - \frac{x^{1/2}}{L_s^{1/2}} \right) \right]^2 \right\} \quad (14)$$

由此可算得在 $(L_s - 20w)$ 到 $(L_s + 20w)$ 范围内的堆积体积应为总抛掷体积的80%左右。实际测得的 λ 值只有0.55, 即这里只有50~60%的堆积量。这一结果和图3的问题一样, 实测体积比原体积少了。其原因可能有二

第一是介质的损失。因为尽管实验中用的是群药包, 抛速均匀, 但局部(药包附近和图1的 $\triangle ABE$ 部分)的介质运动速度是不会一致的。这样, 由于空气阻力的作用可致部分介质散失。如据(8)式计算, 当 $w = 1$ 米时, 最低堆积处应有4毫米的平均厚度。这显然是肉眼可见的, 但实验中未见到这种现象。

L_s 附近的集中堆积区也可有类似的情况。介质颗粒大小不同, 在初速相同的情况下, 它们单独飞行时, 空气阻力的作用将对它们进行筛分: 大块抛距远, 小块抛距近。但实验中各种粒径的砂粒是混杂堆积的。我们可以由此断定它们是群体飞行的, 因而空气阻力很小。但是, 一旦有若干砂粒脱离群体, 它们便会被空气阻力所阻, 达不到集中区。由于砂粒的位置及速度分布的随机性, 脱离群体的砂砾是难免的。这也导致集中堆积区的堆积量减少。

第二是爆破前后介质的容重可能不同。(11)式是面积平衡, 并非质量守恒关系。爆前未扰动介质的结构是孔隙较大的固结砂砾层, 可惜的是未测容重。爆破时原结构被破坏, 成松散体被抛出。落地时由于冲击作用导致砂砾重新组合, 其容重可能增加。

由于这些原因而散失20~30%的体积是可能的。而且抛方越少, 散失的机会越大, 其损失的方量相对增大, 这可能是导致图3情况的原因。

2. 正态分布

关系(10)称为正态分布。在统计理论⁽⁷⁾中, 它是由大数定律确定的。如果砂粒等速抛出, 且是群体飞行的, 由各砂粒在抛出和飞行中要受到各种随机因素的影响而多少偏离靶心。当砂粒足够多时, 它的堆积特征就是(10)式。

此外, 所谓等速抛出, 从统计观点看则是各砂粒的速度具有某一统计分布。从实验结果上看, 其最理想分布自然为下式

$$n = N \exp[-(v - v_0)^2 / v_k] \quad (15)$$

n 表示速度为 v 的砂粒数, N 为速度为 v_0 的砂粒数。关系(15)符合堆积形状(11)式的要求。显然, 这一结果将导致若干砂粒的散失。

3. 堆积的相似性

由(8)式可以看出,比药量不变时, L_w 不变,于是在确定的距离 x 处的相对堆积高度 z/w 便和 w 成正比,它随 w 的增加而增加。再则, L_c 附近的堆积体是几何相似的,其相对堆积高度 z/w 和 w 无关。这样,我们得到 L_c 附近的堆积厚度和 w 成比例地增加,而这一区外的堆积厚度则和 w^2 成比例地增加。因此,当爆破的 w 值改变时,堆积体的形状则是变化的,即堆积体不能保持几何相似。当 w 大到一定程度时, L_c 附近的集中堆积区有可能显不出来。这样,我们似不能指望在大规模爆破时也能形成本文中的堆积形状。

同时,(14)式指出,比药量不变时,在坐标 x 以前的堆积方量与总方量之比和 w 无关; L_c 附近的堆积宽度则和 w 成正比。因而随 w 的增加,集中堆积区的宽度增加;从而此区外的堆积体将越来越多地被包入此区。因而导致两区相混。这一结果将进一步造成: w 增大时近处的堆积将更快地增加。

由上所述,我们看到,在大规模的定向爆破中,要想把抛掷体集中地抛到三~五百米处,可能是办不到的。

此外,实验如图4指出:抛距最小为 $25w$ 时,堆积宽度为 $30w$ 。换句话说 $L_c \gg w$ 时,有 $(x_M - x_m) \propto w$,即抛距远时堆积分散。这一现象可能是必然的。

参加本项实验工作的还有周家汉及89002部队的有关同志,特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 科学院数学研究所第一室一组, 数学学报, 9(1)(1959), 1.
- [2] 冯叔瑜, 朱忠节等, 大量爆破设计及施工, 人民铁道出版社, 北京, (1963), 274.
- [3] 山西省昔阳县大寨公社、科学院力学研究所, 定向爆破在农田基本建设中的应用, 科学出版社, 北京 (1975), 51.
- [4] 土岩爆破文集编委会编, 土岩爆破文集, 冶金工业出版社, 北京 (1980).
- [5] 中国力学工程爆破专业委员会编, 土岩爆破文集第二辑, 冶金工业出版社, 北京 (1985).
- [6] 金星男, 许连坡等, 同[4], 1.
- [7] 格涅坚科, Б. В., 概率论教程, 人民教育出版社, 北京 (1956), 1.

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THROW-PILE SHAPE IN GRIT BY DIRECTIONAL BLASTING ON FLAT GROUND

Xu Lianpo

Abstract

In experiments of directional blasting on flat ground the piles of the thrown grits are comparatively concentrated. In this paper the pile shapes are analysed, and the normal distribution for concentrated pile is obtained. The mechanism for the distributing and the characteristics of pile with different values of w are also discussed.