

关于爆破相似律的一些问题

许连坡

(1984年5月22日收到)

根据对爆破作用机理的理解和相似律基本原理,分析了爆破相似性问题;文中给出了几何相似的条件,并在几何相似条件下分析了爆破中的若干问题;文中还讨论了介质的初始结构、破坏的表面能、时效、漏气和重力等破坏几何相似的因素及其作用机制

一、前言

目前爆破领域的实际情况是理论远落后于生产实践。如就我国爆破技术而言,完全可以解决在四化建设中所遇到的工程爆破问题;但在理论上连单个药包平地爆破的作用机理都不能做定量分析。因此,人们还不能过多地依靠爆破理论来解决工程问题,这时爆破相似律便起着重要的作用。

其次,第二届土岩爆破会议^[1]表明,近年来由于经济建设的发展,我国爆破技术也有了新的发展,如光面、预裂爆破、建筑物的拆除爆破等得到越来越多的应用。爆破技术的发展提出了一些新的问题,需要对这些问题作出相似性分析。最后,由于实际的需要,爆破研究工作也有了新的发展,这也需要在相似律方面给出相应的分析。

本文试图在这方面作一尝试,以便引起更广泛的兴趣。

二、爆破相似律的一般分析

对相似律的一般理论,Л.И.Седов^[2]早就做了透彻的论述,我们用它来研究爆破的问题。为了简单和明确,我们考虑单个球形药包在半无限介质中的爆破问题,如图1。

写出本问题的独立参数。

1. 几何参数

考虑到不耦合装药问题,则几何参数有四个: R —药室半径, R_0 —药包半径, W —最小抵抗线,自药室中心到介质表面的距离, φ —重力方向和界面法线的夹角。

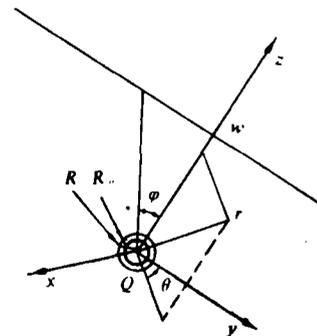


图1 爆破布置图

2. 介质参数

从原则上讲,在介质的本构关系问题解决之前,其特征参数是不能明确给出的。但从目前已知的介质性质和爆破作用机理中可给出下面一些参数。

应力量纲的参数: E_1, E_2 和 G_1, G_2 —介质加、卸载的弹性常数; σ_c, σ_s 和 σ_t —介质的抗压、抗剪和抗拉强度(也可引入破坏条件中的特征量); K_0 —内聚力,它可出现在土和岩石的塑性条件中; K_1 和 K_2 —塑性加、卸载的体积模数。如此等等。

具有速度量纲的量: V_1 —爆破时破坏面传播的速度; V_2 —介质中裂缝传播的速度。取介质的密度为 ρ_0 , 重力加速度为 g , 介质的内摩擦角为 φ_0 。前二个量是否能解决于前边所给的有关参数,尚不清楚,姑且存之。

具有时效的量: 一般来说,如加载率 $\dot{\sigma}$ 和应变率 $\dot{\epsilon}$ 进入本构关系中,则介质便可能具有时效效应。即有一含时间量纲的量引入,但其具体特征量则可以不同,如对粘土, $\dot{\epsilon}$ 的影响可归结为粘性⁵; 对岩体的破坏问题, $\dot{\sigma}$ 的影响⁶ 则可能是裂缝的形成时间。为了方便,我们保留 $\dot{\sigma}$ 和 $\dot{\epsilon}$ 作为特征参量,讨论具体问题时再做处理。

介质的破坏表面能: e_0 。

介质的初始结构: 如岩体的初始裂缝, 砖石砌体的结构, 有的实验中的水泥砌块⁷, 等等。这里至少出现一个长度量纲的特征量 l_0 。

漏气机理: 炸药爆炸后经过一定时间便在介质中出现裂缝, 爆炸产物即沿这些裂缝渗入, 当裂缝和界面联通时, 爆炸产物即可通过裂缝漏掉。这一机理已为实验⁸ 所证实。这里要引进渗流定律。如用线性关系的达西定律⁹

$$\frac{d p}{d \xi} = \frac{\nu}{\beta^2} \rho_0 v \quad (1)$$

这里 p 是渗流压力, 而 ξ 是渗流方向的空间坐标, 故(1)式左端为渗流的压力梯度。这里出现了动力粘性系数 ν , 而 β 则是长度量纲的量。如用渗流的平方定律

$$\frac{d p}{d \xi} = \frac{1}{a} \rho_0 v^2 \quad (2)$$

这里也出现一个长度量纲的量 a , ρ_0 是渗流的气体密度, 它不是独立的参量 v 是渗流速度

3. 炸药爆炸参数

ρ_B —炸药密度, 即

$$\rho_B = \frac{Q}{(4/3)\pi R_0^3 g} \quad (3)$$

这里 Q 是装药量, 公斤。 D —炸药的 actual 爆速; K_m —表示炸药的品种 根据爆轰理论, 爆压不是独立的, 故不能引入。考虑到炸药能量不一定是瞬时释放的¹⁰, 因化学反应不能瞬时完成, 而且尚可能有副反应。因此, 这里尚需引入 t_0 —炸药能量的释放时间 γ —爆炸产物的绝热指数。

4. 坐标参数

要考虑爆区中各点的情况, 尚需写出各点的坐标 我们取柱坐标 原点在药室中心, z 轴方向垂直于界面, θ 取顺时针方向, 且起点自下方算起, 如图 1 时间 t 从药包中心起爆开始。这里出现了四个独立参数: z, θ, r 和 t

综上, 我们写出了35个独立参数。当然, 还可能有些参数, 我们没有写出, 或者这35个参数并不都是必要的和重要的。它们可以组成 $35 - 3 = 32$ 个独立的无量纲参数。可分三类写出。第一类是

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{R_0}{R}, \quad \pi_2 = \frac{R_0}{W}, \quad \pi_3 = \frac{\rho_B}{\rho_c}, \quad \pi_4 = \frac{V_f}{V_l} \\ \pi_5 &= \varphi, \quad \pi_6 = \nu, \quad \pi_7 = \varphi_0, \quad \pi_8 = K_n \\ \pi_9 &= \frac{V_l}{D}, \quad \pi_{10} = \frac{K_f^2}{K_f^2}, \quad \pi_{11} = \frac{\sigma_y}{\rho_B D^2}, \quad \pi_{12} = \frac{\sigma_e}{\rho_B D^2} \\ \pi_{13} &= \frac{\sigma_l}{\rho_B D^2}, \quad \pi_{14} = \frac{K_0}{\rho_B D^2}, \quad \pi_{15} = \frac{K_f^2}{\rho_B D^2}, \quad \pi_{16} = \frac{C_l}{D} \\ \pi_{17} &= \frac{b_l}{D}, \quad \pi_{18} = \frac{E_2}{E_1}, \quad \pi_{19} = \frac{G_2}{G_1} \end{aligned}$$

这里 C_l 是加载纵波波速, b_l 是加载横波波速。其关系为

$$C_l^2 = \left(1 + \frac{G_1}{3G_1 - E_1}\right) \frac{G_1}{\rho_c}, \quad b_l^2 = \frac{G_1}{\rho_c}$$

第二类无量纲参数是

$$\begin{aligned} \pi_{20} &= \frac{l_0}{W}, \quad \pi_{21} = \frac{\rho_c g W}{\rho_B D^2}, \quad \pi_{22} = \frac{\dot{\sigma} R_0}{\rho_B D^3}, \quad \pi_{23} = \frac{\dot{\epsilon} W}{D} \\ \pi_{24} &= \frac{e_s}{\rho_B D^2 W}, \quad \pi_{25} = \frac{\nu}{DW}, \quad \pi_{26} = \frac{a}{W}, \quad \pi_{27} = \frac{\beta}{W} \\ \pi_{28} &= \frac{R_0}{D l_0} \end{aligned}$$

第三类参数是

$$\pi_{29} = \frac{z}{W}, \quad \pi_{30} = \frac{r}{W}, \quad \pi_{31} = \theta, \quad \pi_{32} = \frac{W}{D l_0}$$

根据量纲理论的基本定理可得: 爆破发展过程中和爆破后的任何无量纲的特征量 π 都是上述32个独立无量纲参数的函数, 即

$$\pi = f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{32}) \quad (4)$$

这里 f 是 π_i 的任意函数, 一般由试验和理论分析确定。 π_i 的意义有些是明显的, 有些我们将逐步予以分析。

由(4)式我们看到, 对于两次爆破——实体和模型的爆破, 如使 π_i 相同, 则 π 相同, 即两次爆破相应的特征量均相同, 这就是两次爆破的相似。因此, 简单地说, 研究爆破的相似性就是研究 π_i 不变的条件和机理。

三、几何相似律及其应用

我们假定: 前述的第二类参量均不考虑, 至于它们不存在和可以不考虑的条件, 我们将在后边讨论。

我们再假定两次爆破的介质和炸药是相同的,这就是两次爆破在物理上是相似的。自然,这是比较容易实现的。由于不考虑重力, φ 和 θ 均失去意义。这样,有意义的参数就剩 π_1 、 π_2 、 π_{29} 、 π_{30} 和 π_{32} 了。于是(4)式变成

$$\pi = f\left(\frac{R_o}{R}, \frac{R_o}{W}, \frac{z}{W}, \frac{r}{W}, \frac{W}{Dt}\right) \quad (5)$$

我们看到:要保持这五个量不变,只要保持几何尺寸成比例,时间也和几何尺寸一样,取相同的比例就行了。这就是爆破工作中常用的原则——几何相似律。根据量纲公式立即可得,在几何相似时,二次爆破的特征压力和特征速度相同;而特征长度和特征时间则和几何尺寸成比例的变化。我们看到,几何相似是以物理相似作为基础的。

下面讨论一些具体问题。

1. 不耦合装药

我们只分析爆破后的一些参数,故(z/W), (r/W)和(W/Dt)都不出现,于是(5)式成为

$$\pi = f\left(\frac{R_o}{R}, \frac{R_o}{W}\right) \quad (6)$$

对于爆坑开口半径 R_p , 有

$$\frac{R_p}{W} \equiv n = f\left(\frac{R_o}{R}, \frac{R_o}{W}\right) \quad (7)$$

当(R_o/W)不变时, n 和 (R_o/R) 有关。寻求最佳值,对于(7)取极值

$$\frac{d}{d(R_o/R)} \left[f\left(\frac{R_o}{R}, \frac{R_o}{W}\right) \right] = 0 \quad (8)$$

由此可解得

$$\frac{R_o}{R} = f_n\left(\frac{R_o}{W}\right) \quad (9)$$

即最佳不耦合参数和(R_o/W)有关。代(9)式到(7)式中去,即得最佳不耦合条件下爆破漏斗和量(R_o/W)的关系。类似地,可以研究不耦合装药对其他爆破参数的影响。当然,要完成上述双参数实验,工作量是很大的。

2. 无限介质中的爆破

在(6)式中令 $W \rightarrow \infty$, 则有

$$\pi = f\left(\frac{R_o}{R}\right) \quad (10)$$

即得一切爆破结果均和不耦合参数有关。如采取耦合装药,即(R_o/R) = 1, 则得

$$\pi = c \text{ (常数)} \quad (11)$$

由此得爆后一切几何尺寸均和装药半径 R_o 成比例。这也是工程爆破中常用的原则。

3. 水压爆破

考虑图2的水压爆破布置,则几何参数只有四个:装药半径 R_o , 圆形水池内半径 R_i , 水池高 H 和其壁厚 δ 。他们可以组成三个独立的无量纲参数: (δ/R), (R_o/H), (R_i/H)。于是对爆破的破坏块度 A 有

$$\frac{A}{\delta} = f\left(\frac{R_0}{H}, \frac{\delta}{R}, \frac{R}{H}\right) \quad (12)$$

解出 (R/H) , 则得

$$\frac{R_0}{H} = f_x\left(\frac{\delta}{R}, \frac{R}{H}, \frac{A}{\delta}\right) \quad (13)$$

此式右端可化成装药量 Q

$$Q = \rho_s g \delta R H f\left(\frac{\delta}{R}, \frac{R}{H}, \frac{A}{\delta}\right) \quad (14)$$

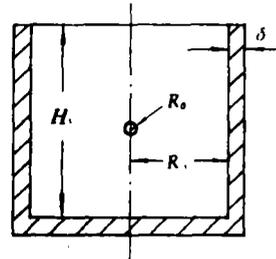


图2 水压爆破布置图

式中 (R/H) 变化不会很大, 实际上它控制着爆破时水中击波的波长, 即击波波长和 H 相差不多。我们自然希望波长大一些, 可以增加动压的作用, 但 (H/R) 太大时, 水池上下两端 (特别是上端) 的破坏将很困难。

一旦确定破坏程度的参数 (A/δ) 选定, 则 Q 便只是两个参数的函数了。又由于 (R/H) 变化不会太大, 故 Q 基本是一个参数 (δ/R) 的函数。这样, 实验工作还是能够进行的, 由此便可找到关系 (14) 的具体形式, 它就是水压爆破的药量计算公式。

4. 地震效应

首先, 对单药包爆破, 我们研究地表的质点振动速度。这时 $z=W$, 取 $R_0=R$, 则 (5) 式变成

$$v_d = \frac{\sigma_1}{\rho_c c_1} f\left(\frac{R_0}{W}, \frac{r}{W}, \frac{Dt}{W}\right) \quad (15)$$

求出最大的 v_d 值, 即取

$$\frac{dv_d}{dt} = 0 \quad (16)$$

由此解出 (Dt_M/W) , 再代回 (15) 式中, 得

$$v_M = \frac{\sigma_1}{\rho_c c_1} f\left(\frac{R_0}{W}, \frac{r}{W}\right) \quad (17)$$

这就是地震波峰值和 (R_0/W) 及 (r/W) 的关系。我们把 (17) 式中的 (r/W) 换成 (R_0/r) , 并对它做泰勒展开。由于问题中只有随 r 衰减的波, 且 $r \rightarrow \infty$ 时, $v_M \rightarrow 0$ 。于是有

$$v_M = \frac{\sigma_1}{\rho_c c_1} \left[f'\left(\frac{R_0}{W}\right) \frac{R_0}{r} + \frac{1}{2!} f''\left(\frac{R_0}{W}\right) \left(\frac{R_0}{r}\right)^2 + o\left(\frac{1}{r^2}\right) \right] \quad (18)$$

这里 $(1/r)$ 和 $(1/r^2)$ 的项对应着体波的作用; $o(1/r^2)$ 项则表示耗散。工程中采用单项幂函数来代替关系 (17)。由于近区不可逆损失大, 故衰减指数大; 远区则相反。单项式的系数中一定包含有参数 (R_0/W) 。

实际上, 工程爆破多为群药包爆破。对于这种情况, 相似理论给出, 当观测点到爆区的距离比爆区的尺度大得多时, 把群药包爆破的地震衰减用单药包的情况来代替才有可能。

5. 拆除爆破中的地震问题

首先我们分析爆破本身引起的地震问题。如图 3, 一圆柱形的混凝土柱, 地面以下的长度为 h_3 。药包 Q 埋入柱的对称轴上, 在几何相似的前提下, 其独立的无量纲参数有五个: (r_0/b) , (h_1/b) , (h_2/b) , (h_2/h_3) 和 (r_0/r) 。于是有

$$v_M = \frac{\sigma_y}{\rho_H C_H} f\left(\frac{r_0}{b}, \frac{h_1}{b}, \frac{h_2}{b}, \frac{h_2}{h_3}, \frac{r_0}{r}\right) \quad (19)$$

这里 σ_y 为柱的某一强度, ρ_H 为其密度, C_H 为其弹性波速, r_0 为装药半径; 余均如图 3 所示。这个关系中的 h_1/b 是由布药决定的。对不同的爆破要求, 其取法可能不同, 但它不是任意的。又由于比药量 (Q/V) ($Q = (4/3)\pi r_0^3 \rho_B g$, $V = (\pi/4)b^2 h_1$; 取 $h_1 = b/2$ 时) 由破坏要求决定, 一般可取定数。这样, 由于五个参数要满足两个条件, 便只有三个是独立的了。这样, (19) 便化成

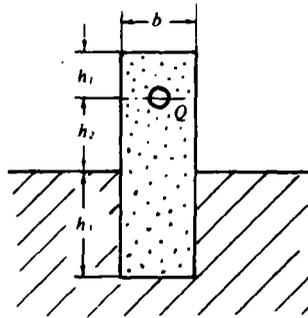


图 3 拆除爆破示意图

$$v_M = \frac{\sigma_y}{\rho_H C_H} f\left(\frac{h_2}{b}, \frac{h_2}{h_3}, \frac{r_0}{r}\right) \quad (20)$$

这一结果和关系 (17) 有着重要差别, 除了空间衰减外, 柱的尺寸和位置起着作用。实际上这一问题中, 地的震动是由柱的运动引起的。应力波先在柱中传播, 然后进入地下。这和直接在地中爆破是不同的。因此, 如仍把地震质点运动最大速度整理成 (r_0/r) 的单项幂函数, 则系数中含有 (h_2/b) 和 (h_2/h_3) , 而关系 (17) 则含有 (R_0/W) 。对于一般的爆破, (R_0/W) 变化不很大, 目前都不考虑其影响。但 h_2 的变化却很大, 它有时甚至在地面以下, 因此不能不考虑。

其次, 我们分析落体的冲击地震。一圆饼形块体, 直径为 b , 厚为 h , 以速度 V 落地。由于介质不变, 故其参数可不写出, 但在用时仍要引用。这里有意义的参数有: (h/b) , (b/r) , $(\rho_H V^2/\sigma_y)$ 。这里的 σ_y 是落体的某一强度, ρ_H 是其密度。于是有

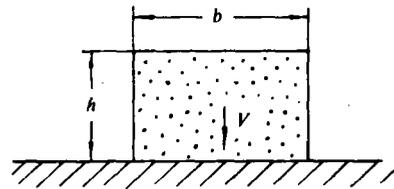


图 4 落体的冲击

$$v_M = V f\left(\frac{h}{b}, \frac{b}{r}, \frac{\rho_H V^2}{\sigma_y}\right) \quad (21)$$

这里 r 是测点到落体中心的距离。这个关系表明: 在几何相似下进行模拟, V 是不能变的。

另外, 若仍如处理爆破地震那样, 把 v_M 写成空间衰减的单项式, 即把 (21) 中的三个参数进行组合, 得参数 $(b^2 h V^2 / r^3 \sigma_y)$, 则 (21) 式可写成

$$v_M = V f\left(\frac{h}{b}, \frac{b}{r}, \frac{b^2 h V^2}{r^3 \sigma_y}\right) \quad (22)$$

这样, 单项式的系数中一定含 (b/r) 或 $(\rho_H V^2/\sigma_y)$ 。即这个问题中, 并不像单药包爆破地震那样, 只要保持 (R_0/r) 不变, 就大致可实现模拟了。因此, 这里只按单参数整理数据是无意义的。

四、几何相似律不成立的情况

我们前边给出六个能破坏几何相似律的因素, 这就是介质的初始结构和表面能、漏气效应、材料的时效、重力影响和炸药能量的释放时间等。对土岩爆破, 这些因素一般都有影响,

故几何相似严格成立的情况并不多，因而分析这些因素则可判断几何相似成立的条件。

1. 介质的初始结构和表面能

除了前述的情况外，对一般的岩体也是存在初始结构的，比较重要的有二类：第一类是尺寸大的结构，如山体的断层、大的裂隙、夹层和破碎带等。它们对爆破的影响是众所周知的，爆破时需专门处理。第二类是一般的结构，如岩体的层理和小裂隙等，其特征尺寸不大，一般有 $(l_0/W) \ll 1$ 。由爆块统计证明，多数岩块是按原构造面断开的。因此 l_0 对破坏起着重要作用。我们把参数 π_{20} 和 π_{24} 构成 $(e_s/\rho_B D^2 l_0) = (\pi_{24}/\pi_{20})$ ，当介质和炸药不变时它是不变的。其物理意义为按 l_0 尺度破坏的表面能和总炸药能量之比。它不破坏几何相似律。可以用它代替 π_{20} 和 π_{24} 中的一个。这样，两个破坏几何相似的参数换成一个破坏几何相似的参数了。当 l_0 不存在时，参数 π_{24} 表示破坏表面能和总能量之比。当规模增大时，表面能的比例减小，能量分配发生变化，导致几何相似被破坏。当 $(l_0/W) \ll 1$ 时，它单独的影响可能不大。对于土，这两个参数均可不考虑。

2. π_{28} 的影响

在我们的问题中，有三个重要的特征时间：自起爆到弹性波到达临空面的时间 $t_r = (W/C_1)$ ；破坏面到达临空面的时间为 $t_p = (W/V_p)$ ；爆轰完成的时间 $t_B = (R_0/D)$ 。 $t_r \ll t_p^{(1)}$ ，由于 C_1 和 D 同一量级，而 $R_0 \ll W$ ，故 $t_B \ll t_r$ 。对一般的药室爆破， R_0 可到一米，故 $t_B \approx 2 \times 10^{-4}$ 秒。对于 t_0 ，则缺乏足够的的数据，但可认为它在 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 秒的量级，即和 t_B 同量级。如在大的工程爆破中 t_B 可不考虑，则 t_0 也可不考虑。但在小型爆破和实验室实验中，则 t_0 不能不考虑。因 t_0 影响应力波形，因而影响破坏。由于破坏是以“波”的形式推进的，距爆心为 r 处的一块岩体的破坏时间，显然是 $\Delta t_r = [(1/V_p) - (1/C_1)]r$ 。取 r 为 $2r_0 = 2$ 米，则 $\Delta t = 2 \times 10^{-3}$ 秒，它比 t_0 大得多。故除药室附近外， t_0 对破坏的影响是不大的。

3. 漏气效应

我们分析参数 π_{25} ， π_{26} 和 π_{27} 。首先考虑两种渗流作用的比较。由(2)式，按平方定律的渗流速度为 $(\rho_B D^2 a / \rho_B W)^{1/2}$ ；由(1)式，按达西定律的渗流速度为 $(\rho_B D^2 \beta^2 / \rho_B v W)$ 。它们的比为 $\pi_{25} \sqrt{\pi_{26} / \pi_{27}} = (v/DW)(a/W)^{1/2}(W/\beta)^2$ 。可以看到，当 v 增大时渗流的平方定律的成分增加；当 W 增加时效果相同也是平方定律的成分增加，反之相反，这一结果是由压力梯度造成的。其次，我们分析渗流作用的效果，即由于渗漏而损失的气体量。容易证明，爆炸时介质中所出现的裂缝的体积（即介质压缩后所留下的空间）决定于量 $[1 - (K_f/K_s)]$ 。令 v 是渗流速度，则 dt 时间的渗流量为 $[1 - (K_f/K_s)]\rho_z r^2 v dt$ ， t 时间的渗流量为

$\int_{t_H}^t [1 - (K_f/K_s)]\rho_z r^2 v dt$ ，这里 t_H 为 r 处开始渗流的时间。如渗流按平方定律进行，则渗流量为

$$\Delta Q = \int_{t_H}^t (1 - \frac{K_f}{K_s}) \rho_z r^2 (\frac{a}{W})^{1/2} D dt \tag{23}$$

此值和总的气体量相比

$$\frac{\Delta Q}{Q} = (1 - \frac{K_f}{K_s}) (\frac{a}{W})^{1/2} \frac{D t_H}{W} (\frac{W}{R_0})^3 \int_{t_H}^t \frac{\rho_z}{\rho_B} (\frac{r}{W})^2 d \frac{t}{t_H} \tag{24}$$

我们看到，决定渗流量的参数是 $[1 - (K_f/K_s)](a/W)^{1/2}(Dt_H/W)(W/R_0)^3$ 。如果渗流按

达西定律进行, 则这一参数为 $[1 - (K_1^p/K_1^s)](DW/v)(\beta^2/W^2)(Dt_H/W)(W/R_0)^3$ 。我们看到, 如果保持 (R_0/W) 不变, 认为量 (Dt_H/W) 也不变, 则得到: 规模小时渗流作用大, 规模大大时其作用变小。但到多大规模时这效应才可以不考虑, 则要具体分析。在粘土中, 当 $W > 3^{(11)}$ 米时, 这一效应(包括粘性)可能就不大了。在砂砾石⁽¹¹⁾中, 对应的 W 值可能更小些。

4. 应变率和加载率的影响

对于粘土, 应变率的影响实际上是粘性 ζ , 这时代替 π_{23} 的是雷诺数 $(v_c/W D)$, 这里的 v_c 是介质的运动粘性系数。雷诺数 $(v_c/W D)$ 表示粘性力和惯性力之比, 当规模大时它的影响变小。对于岩体, 其表现实质尚待研究。加载率的影响, 如前述, 对于岩体它可归结为破坏时间。如距爆心为 r 处的介质的破坏时间为 $t_{pr} = [(1/V_p) - (1/c_1)]r$, 它对应 r 处的应力为 $\sigma_{ij}(r, t)$ 。自 σ_{ij} 中解出 r , 代入 t_{pr} 中去, 即可表示 t_{pr} 和 σ_{ij} 有关, 实际上它可能是 $\sigma_{ij}(t)$ 的一个泛函。

5. 重力影响

这是爆破界讨论了多年的问题之一。由于 π_{21} 表示重力和爆炸压力之比。显然, 对大的 W 它才起作用, 这时渗流作用减小, l_0 的作用则存在。

首先, 我们指出, 对破坏范围的影响, 重力的作用和介质中初应力的作用(这个问题我们没有考虑)是类似的, 只要 $[(\rho_c g W)/\sigma_i] \ll 1$, 则它的作用就可忽略。当 $W = 50$ 米时, $\rho_c g W = 15$ 千克/厘米², 这一效应便不能不考虑了。其次, 我们考虑平地爆破的漏斗尺寸, 如可见漏斗半径和可见漏斗深度, 这时 $\phi = 0$ 。因为它们是爆后的结果, 自然重力是起作用的。但文献(12)表明, 在埋深不太大时(不超过20米), 几何相似律还是正确的: 当 W 达到40米时, 重力的影响确实出现。这时漏斗半径可写成

$$n = f\left(\frac{R_0}{W}, \frac{gW}{D^2}, \frac{a}{W}, \frac{l_0}{W}\right) \quad (25)$$

f 的形式尚不知道。有人从能量的观点出发, 认为它应含有 W' 项(因势能为 $W'^2 \cdot \lambda W$); 有人则主张为 $W^{3.5}$ 。实际上这是和爆破机理有关的。 W' 是基于连续鼓包的设想而得到的。漏气效应提出后, 爆炸产物不再对全部漏斗中的介质起推动作用, 故重力的作用可以使 W 的方指数比3大, 但还达不到4次方。同时它对漏斗半径和漏斗深度的作用是不同的(详后)。第三, 我们考虑抛掷速度。这时须考虑渗流的作用, 因而有

$$v = \frac{\sigma_i}{\rho_c c_1} f\left(\frac{R_0}{W}, \frac{gW}{D^2}, \frac{a}{W}, \frac{l_0}{W}\right) \quad (26)$$

我们把参数重新组合一下: 用 $(Wg/D^2) \cdot (a/W)$ 代替 (a/W) , 用 (l_0/a) 代替 (l_0/W) , 则得到

$$v = \frac{\sigma_i}{\rho_c c_1} f\left(\frac{R_0}{W}, \frac{gW}{D^2}, \frac{ga}{D^2}, \frac{l_0}{a}\right) \quad (27)$$

参数 (ga/D^2) 实际上是介质自重造成的渗流, 这时气体压力和重力平衡。这就是文献(11)的结果。参数 (l_0/a) 则表示沿介质固有结构的渗流作用。我们看到, (27)式中破坏几何相似的参数就剩一项了。即归结为重力的作用。自然, 漏气的因素仍旧存在, 但它不一定是能量的完全损失——气体进入大气, 而是气体能量对介质作用的不同分配。这一结果对可见漏斗深度的影响较大。第四, 斜坡地爆破问题。这时, 由于重力存在, 故 ϕ 和 θ 都出现, 即问题不再是轴对称的了。因而重力影响出现后, 爆破漏斗不再是轴对称的了。至于可见漏斗, 则已有

了许多实践资料,可供工程应用

对于运动速度则要注意下述现象:由于漏斗中各质点的运动方向和重力的关系各不相同,从而漏斗中各质点的重力影响是不同的;又由于重力和漏气是耦合的,因而重力又导致漏气作用的变化。这样,重力不仅影响到运动速度的大小,也影响到速度在漏斗中的分佈。因此,对大规模的定向爆破来说,重力的影响是重要的和复杂的。对于各向同性均匀介质的斜坡地形爆破,只有重力才导致参数 φ 和 θ 的出现。

由上可见,小规模爆破比大规模爆破的影响因素多而复杂

著者对杨振声同志表示感谢!

参 考 文 献

- (1) 第二届土岩爆破学术会议论文汇编,福州 (1982)。
- (2) Седов, Л. И., 著 (沈育等译), 力学中的相似方法与量纲理论, 第一章, 科学出版社 (1982)。
- (3) 许连坡, 爆炸与冲击, 3(3) (1983), 10。
- (4) Адушкин, В. В., и др., П. М. Т. Ф., 4(1961), 94。
- (5) Ляхов, Г. М., Ф. Г. В., 13 (5) (1977), 755。
- (6) 朱瑞康、吴绵拔, 爆炸与冲击, 4(1) (1984), 1。
- (7) 黄元清, 爆破介质抛掷运动的观测与研究, 土岩爆破文集, 冶金工业出版社, 北京 (1980), 35。
- (8) 许连坡等, 爆炸与冲击, 4(2) (1984), 31。
- (9) 阿拉文, В. Н., 努美罗夫, С. Н., (王仁东译), 滤波理论, 上册, 第二章, 高等教育出版社, 上海 (1958)。
- (10) 许连坡、章培德, 土中爆炸初始阶段的空腔和压密层, 土岩爆破文集, 第二辑, 冶金工业出版社, 北京 (1985)。
- (11) 金星男等, 平地定向爆破试验研究, 土岩爆破文集, 冶金工业出版社, 北京 (1980), 1。
- (12) Докучаев, М. М., и др., Взрыв на Выброс, ИЗД, АН СССР, Москва, (1963), 75。

SOME PROBLEMS ABOUT THE LAW OF SIMILITUDE IN BLASTING

Xu Lianpo

Abstract

According to the understanding of blasting mechanism and basic theory in law of similitude, similarity in blasting is analysed in this paper. The condition of geometric similarity is given and some blasting problems under this condition are studied. In addition, the factors which make the condition of geometric similarity unapplicable and their effect mechanisms such as initial structure of medium, surface energy in fracture, time effectiveness, gas leakage and gravity are discussed.