

工程爆破的模型试验与模型律

杨振声

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 本文在探讨工程爆破物理过程的基础上,分析了在何种条件下几何相似律与能量准则成立的条件。对药室爆破、深孔爆破及水下爆破都分别作出了相应的爆破模型律,并给出了在实验室内做模型试验时选择模型材料的方法。

关键词 模型律 工程爆破 模型材料

MODELING EXPERIMENT OF ENGINEERING BLASTING AND MODEL THEORY

Yang Zhensheng

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100080)

ABSTRACT Based on the analysis of physical processes of engineering blasting, the conditions while geometrical similarity law and energy criterion hold were illustrated. Modelings of chamber blasting, longhole blasting and underwater blasting were given. A method for selection of modeling materials in lab modeling tests was given.

KEY WORDS Model theory Engineering blasting Modeling materials

工程爆破主要是以岩土为对象,在矿山、铁路、交通、水利、城市、港湾等基本建设中广泛应用的一种施工方法。根据不同的施工对象和爆破效果,又可分成药室爆破(包括抛掷、松动、筑坝等),深孔爆破(包括台阶、预裂、光面、挤压等),水下爆破(处理软基、水下作业、疏通航道等),以及城市建筑的拆除爆破等。由于爆破受地质情况等影响较大,条件较复杂,所给出的药量计算公式都带有经验的局限性,往往不同人给出的公式都有所不同,很难判断。因此人们常在大工程前在施工区内做小试验炮,以确定药量公式的一些经验参数,实际上这是一种模型试验,一般是在几何相似律前提下来实施的。此外,研究与探索新的技术也需要大量的系统的实验数据,而现场大型试验耗费过大,有时很难得到准确的规律,因此必须在实验室内做系统的模型试验。这些都需要建立模型律,以便确定大型工程所必需参数,如炸药量、药室间距、延时等,以及爆破效果如爆坑、抛掷量等。模型律必

杨振声:研究员,博士生导师;中国工程爆破协会第一届理事会副理事长,《工程爆破》编辑委员会副主任。

须建立相似参数, 根据相似参数来做实验, 可简化实验次数, 达到事半功倍的目的。本文就模型试验和模型律做一探讨。

1 模型试验的独立物理量

做模型试验和建立模型律, 首先必须弄清爆破的整个物理过程, 抓住主要的物理现象, 在机理研究的基础上, 选择独立的物理量, 建立相似参数, 有时也可借助一些物理方程式来进行判断。

在土岩爆破中主要涉及两种介质, 即炸药和岩石(或土)。在水下爆破时, 还应考虑水这种介质。现讨论如下。

1.1 炸药

炸药是一种化学爆炸物, 炸药起爆后以爆轰波的形式传播, 当其达到稳定爆轰后, 波速 D 是一个常值。对于每一种炸药在密度确定的前提下, 稳定爆轰时 D 有一个确定值。因此 D 是一个独立物理量。

每一种炸药每千克都有确定的能量, 所以炸药量 Q 代表所确定的能量 E , 可以选择炸药量 Q 或能量 E 作为独立的物理量。模型试验时, 用药量都很小, 而通常工业炸药, 临界起爆直径都较大, 因此模型试验和现场工程所用的炸药量相差很大。放大倍数不大时(一般不超过30倍), 有时可用当量来描述, 即模型试验所用的炸药与现场炸药的当量之比。在工程施工时, 将模型试验所用的药量, 经过放大所需的药量再乘上当量系数。而放大倍数很大时, 必须用能量 E 作为独立物理量。

炸药的一个特点是高能率, 因而威力大, 破坏性也大。对于一般密度 ($\rho_B = 1 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$) 较大的凝聚体炸药, 爆轰波的波速正比于 ρ_B , 于是可精确地认为爆轰波波后的压力正比于 ρ_B 的3次方。给定了 ρ_B 和 D 就能计算出爆轰波后任一点上的爆炸产物压力 p 和密度 ρ , 以及质点运动速度 u 。而爆轰波波头的压力、密度和速度分别为:

$$p = (1/4) \rho_B D^2 \quad \rho = (4/3) \rho_B \quad u = (1/4) D \quad (1)$$

因此选择 D 作为独立物理量后, p 、 ρ 、 u 都是确定值。

炸药爆轰后, 形成的高温、高压爆炸气体, 一方面起到维持爆轰波传播的作用, 另一方面将继续膨胀作功, 它的运动可以用气体动力学的方法来处理。由于炸药爆轰时间极短, 而整个运动时间并不长, 这时假设爆炸产物是等熵绝热的, 即满足状态方程:

$$p/p_0 = (\rho/\rho_0)^\gamma \quad (2)$$

其中: p_0 是爆炸气体的初始压力; ρ_0 是爆炸气体的初始密度, 而 p_0 和 ρ_0 都可根据爆轰波波速 D 和密度 ρ_B 来确定。 γ 是爆炸气体的状态方程参数, γ 在压力、密度较大时等于3, 密度小时约为1.3。

给出炸药量后, 在给定初始密度 ρ_B 的前提下, 药包的几何尺寸是确定的, 对于集中药包为 $Q^{1/3}/\rho_B$, 条形药包为 $Q^{1/2}/\rho_B$, 此外在群药包时还有药室(包)的间距 d 等。

爆破时通常采用多段延时 (t_1, t_2, \dots, t_n) 起爆法, 如采取时间 t^* 为特征延时时间, 则 $t_1 = k_1 t^*$, $t_2 = k_2 t^*$, $\dots, t_n = k_n t^*$, 而当 k_1, k_2, \dots, k_n 不变时, 则 t^* 是一个独立物理量。如考察不同延时的作用, 则 t_1, t_2, \dots, t_n 都是独立物理量。

因而综合起来炸药的独立物理量为: ρ_B 、 D 、 γ 、 Q (或 E)、 d 、 t^* , 而其中 γ 是无量纲量。

1.2 岩石和土

岩石和土的性质有所不同。岩石是脆性材料，塑性较小；而土的弹性阶段较小，主要是塑性。

从岩石爆破工程实践来看，爆破只在离药室半径的几倍处产生新鲜破裂面，而远区沿着岩体原有的裂隙破坏。这样从损伤力学角度来看，岩体的本构关系，除了弹性模量 E 和泊松比 μ 及岩体破坏强度 σ^* 外，初始的损伤系数 D_1 是一个独立物理量。

土是多孔材料，其屈服和破坏极限与静水压力 J_1 不变量有关，因此一般不用Mises准则，而用与 J_1, J_2 有关的库仑摩擦准则，即

$$\tau = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c \quad (3)$$

式中： τ 是主剪应力； σ 是主应力； φ 是内摩擦角； c 是粘滞力，其中 φ 和 c 是独立物理量。

土颗粒中多含有水，若含水量高则为饱和土，因此在受静载条件下，有超静水压力，然后是排水固结的过程，一般用太沙基的理论，即

$$\partial^2 u / \partial t^2 = c_v \nabla^2 u \quad (4)$$

u 是饱和土中的空隙水压力， c_v 是固结系数：

$$c_v = k(1 + e_m) / r_w a \quad (5)$$

其中： k 是土的渗透系数； e_m 为孔隙率； r_w 为水的密度； a 为土的压缩系数。这些都是独立物理量。

土的本构关系和粘性有关，基本上是一个宾汉体，满足下列关系：

$$\tau = \tau_0 + \lambda \dot{\gamma} \quad (6)$$

其中： τ 是剪应力， $\dot{\gamma}$ 是剪应变率，而 τ_0 和 λ 是本构关系的独立物理量。

此外还有一些爆破体本身的几何尺寸，如最小抵抗线 W 和药室特征尺寸 L_s 等。

综合起来，在岩石介质中的独立物理量为： ρ 、 E 、 μ 、 D_1 、 σ^* 、 W 、 L_s 。在土中的独立物理量为： ρ 、 τ_0 、 λ 、 φ 、 c 、 k 、 e_m 、 r_w 、 a 、 L_s 、 W 。

1.3 水

水中爆破时，爆轰波传到水中为一冲击波，以及爆炸气团在水中作膨胀运动。因此从动量守恒、质量守恒中除了初始密度 ρ_{w0} 以外，不产生新的独立物理量，唯有水的状态方程产生新的独立物理量。一般水的状态方程用Tait方程：

$$p = (a_w^2 \cdot \rho_{w0} / n) \{ (\rho / \rho_{w0})^n - 1 \} \quad (7)$$

其中 a_w 是常压时水介质的声速， n 是一无量纲指数，当 $a_w = 1500 \text{m/s}$ 时， $n = 7$ 。因此水介质在水深 H_w 的条件下，其独立物理量为： ρ_{w0} 、 n 、 a_w 和 H_w 。

2 各种爆破的相似参数

上述分析了工程爆破的主要物理过程和介质的主要性质，并借助方程式来确定物理量。但不同爆破有不同的特点，特别是爆破方式和爆破效果，因此应针对各种爆破选择一些独立物理量，组成相似参数。现分以下几种情况讨论。

2.1 药室爆破

药室爆破，人们常分抛掷爆破和松动爆破。这些爆破都属于在有抵抗线的前提下的浅层岩土中的爆炸，其特点是有鼓包运动，形成爆破漏斗。定向爆破筑坝，主要是看爆破抛掷堆积的效果。而抛掷堆积除上述独立物理量外，还应考虑抛掷过程中的空气阻力 f 和重力加速度 g 的影响。

首先确定山体的几何特征尺寸。如果是平地爆破，是在半无限面下有一个单集中药包，除药包尺寸外，只有药包离上平面的垂直距离为 W ，这就是通常所说的最小抵抗线，是唯一

描述的几何特征量。而当群集中药包布置时，除了上述几何特征量，还有药包间距 d 。而布置条形药包时，条形药包长度 l 也是一个特征量。

当在一个高度为 H 的山体中，在山腰某处置放药室时，置放药室中心至山坡表面的垂直高度 H_1 是一特征尺寸。如 $H_1/W > 1$ 、 $H/H_1 \gg 1$ 时， W 对于表征爆破效果的爆破漏斗、抛掷量来说，是唯一特征量，而当 $H_1/W < 1$ 时，则要考虑其他参数的影响。但不管什么情况，考虑抛掷堆积时， H_1 总是必须考虑的一个独立物理量。而当 $H/H_1 > 1$ 及 $H_1/W < 1$ 时，这就是所谓多临空面的情况，此时几何特征量要多一些。

因此，在岩石洞室爆破时，独立物理量为： ρ_B 、 D 、 γ 、 Q 、 d （群药包间距）、 t^* （延时）、 ρ 、 E 、 μ 、 σ^* 、 D_1 、 W 、 H 共13个，其中 γ 、 μ 、 D_1 为无量纲量，故只有10个有量纲的独立物理量。根据 Π 定理，可组成7个无量纲的相似参数：

$$\frac{\rho_B}{\rho}, \frac{(E/\rho)^{1/2}}{D}, \frac{(Q/\rho_B)^{1/3}}{W}, \frac{H}{W}, \frac{d}{W}, \frac{\sigma^*}{\rho_B D^2}, \frac{t^*}{d/(E/\rho)^{1/2}}$$

再加上 γ 、 μ 、 D_1 三个无量纲量。一般选择相似参数，都具备物理意义。现分别对上述相似参数作一分析。

$\frac{\rho_B}{\rho}$ 代表爆炸物与岩石惯性的关系； $\frac{(E/\rho)^{1/2}}{D}$ 代表岩石的声速与炸药爆速的比例；

$\frac{\sigma^*}{\rho_B D^2}$ 代表岩石强度与爆轰波波头压力的比例； $\frac{t^*}{d/(E/\rho)^{1/2}}$ 代表延时和岩石中声波从一药

包到另一药包所需时间的比例。其他都是几何参数量之间的比例。一些无量纲量如 γ 、 μ 都要保持不变，一般炸药 γ 都差不多，而岩石中的 μ 都为0.3左右，而 D_1 主要用于爆破后块度分析。任何一个标志爆破效果物理量的无量纲参数都是上述相似参数的函数。例如爆破漏斗，其上口半径为 L ，那么

$$\frac{L}{W} = f\left(\frac{\rho_B}{\rho}, \frac{(E/\rho)^{1/2}}{D}, \frac{(Q/\rho_B)^{1/3}}{W}, \frac{H}{W}, \frac{d}{W}, \frac{\sigma^*}{\rho_B D^2}, \frac{t^*}{d/(E/\rho)^{1/2}}, \gamma, \mu, D_1\right) \quad (8)$$

上述参数没有考虑重力加速度的影响，重力加速度实际上是代表时间的尺度。众所周知，重力不管在什么情况下，都客观地起作用，只不过其影响程度能否忽略的问题。在重力作用下，垂直方面的位移 $h \propto t^2$ ，在自由落体情况下， $h = \frac{1}{2}gt^2$ 。如果爆破效果的几何尺度为 Δ ，而 $\Delta/h \gg 1$ 时，就无需考虑重力影响。例如抵抗线为10m、单耗为 1.4kg/m^3 、鼓包运动时间为0.35s，运动最高位置 Δ 为11m。而 $h = 0.6\text{m}$ ，这样重力影响不明显，可以忽略。因此，从工程爆破实践来看，在抵抗线为25m以内是可忽略重力影响的。

在大型爆破工程中，往往在工点做一些试验炮，此时重力影响不明显，而在地质情况相似、炸药不变和不延时，只考虑爆破漏斗、抛掷量，则

$$L/W = f(Q^{1/3}/W) \quad \text{或} \quad Q^{1/3}/W = kf(L/W) \quad Q^{1/3}/W = kf(n) \quad (9)$$

令 L/W 为 n ，则 n 就是爆破界所说的爆破作用指数，实际上是代表爆破效果的无量纲量。一般而言， $kf(n)$ 是要通过系列试验来确定的， k 为介质的特征常数，而 $f(n) = 0.4 + 0.6n^3$ ，这就是著名的鲍列斯科夫药量计算公式中表征标准、抛掷、扬弃爆破的特征量。上述公式是在不考虑重力影响、满足几何相似律产生的。

同样，鼓包运动最大速度 v ，鼓包运动的最大位移 y ，也相应为：

$$v/D = f(Q^{1/3}/W) \quad y/W = f(Q^{1/3}/W)$$

模型律证明，小模型试验放大到大型工程成 N 倍条件下， W 增加 N 倍，而 Q 增加 N^3 倍，鼓包运动 v 不变，爆破漏斗半径和鼓包运动最大位移增加 N 倍，时间 t 增加 N 倍，而抛掷量增加 N^3 倍，其余如漏斗中残余量，上、下破裂线都是相似的。

以上是讲集中药包的情况，对于条形药包常常用单位长度的药量 q ，则 $\frac{(q/\rho_B)^{1/2}}{W}$

是代替集中药包 $\frac{(Q/\rho_B)^{1/3}}{W}$ 的相似参数。

如果放大倍数过大，例如100倍到200倍，或抵抗线过大，这时用炸药的能量代替炸药量作为独立物理量较为合适。以条形药包为例，用单位长度的能量 e 作为独立物理量，此时独立物理量为：

$$\rho_B, D, \gamma, e, d \text{ (群药包间距)}, t^* \text{ (延时)}, \rho, E, \mu, \sigma^*, D_1, W, H, g$$

以上已考虑了重力的影响。有11个有量纲的独立物理量，可组成8个相似参数，加上 γ 、 μ 、 D_1 三个无量纲量，这样组成的相似参数为：

$$\frac{\rho_B}{\rho}, \frac{(E/\rho)^{1/2}}{D}, \frac{e}{\rho g H^3}, \frac{e}{\sigma^* H^2}, \frac{\sigma}{\rho_B D^2}, \frac{t^*}{d/(E/\rho)^{1/2}}, \frac{H}{W}, \frac{d}{W}, \gamma, \mu, D_1$$

其中 $e/\rho g H^3$ 代表炸药能量和岩石势能的关系； $e/\sigma^* H^2$ 代表炸药能和岩体变形能之间的关系。任何一爆破效果标志的物理量所组成的无量纲参数，都将是这些相似参数的函数。

在特殊情况下，如在原工点做试验炮，炸药品种不变，地质条件、岩石性质也基本不变的情况下，在大抵抗线时，其爆破作用指数： $n = f(E/\rho g W^4)$ (10)
式中 E 是集中药包的总能量，相应可算出炸药量， W 是抵抗线， ρ 是岩石密度。则

$$E = \rho g W^4 k_0 f(n) \quad (11)$$

从上式看出，炸药量不与 W^3 成正比，如果得到同样的 n 值，炸药量要增加4/3倍。

以上讨论的是岩石的洞室爆破。对于在土中爆破，若只观察漏斗、鼓包运动和抛掷量，可以忽略排水固结的一些土力学参数，则独立物理量为：

ρ_B, γ, D, Q, d (药室距离)、 t^* (延时)、 $\rho, \tau_0, \lambda, \varphi, c, W, H$ (山高) 共13个独立物理量，其中 γ, φ 为无量纲量。根据 Π 定理，可组成8个无量纲的相似参数，即

$$\frac{\rho_B}{\rho}, \frac{(Q/\rho_B)^{1/3}}{W}, \frac{\tau_0}{\rho_B D^2}, \frac{c}{\rho_B D^2}, \frac{t^*}{d/(\tau_0/\rho)^{1/2}}, \frac{d}{W}, \frac{H}{W}, \frac{\lambda/\tau_0}{W/(\tau_0/\rho)^{1/2}}$$

除与前面岩石爆破中相同的相似参数外，其他参数的物理意义为： $\frac{\tau_0}{\rho_B D^2}$ 代表土中剪力与

爆轰波头压力的关系； $\frac{t^*}{d/(\tau_0/\rho)^{1/2}}$ 代表延时与剪切波在两药室之间传播时间的关系；

$\frac{c}{\rho_B D^2}$ 代表土的粘滞力与爆轰波头压力的比例关系；而 $\frac{\lambda}{\tau_0}$ 是土本构关系的特征时间；

$\frac{\lambda/\tau_0}{W/(\tau_0/\rho)^{1/2}}$ 代表土的特征时间与剪切波到山体边缘所需时间的比例关系。考虑到土中爆

破时应变率比较小，因此后者对于爆破效果是不敏感的，可忽略。

在现场作试验炮时，要求 $H/W > 1$ 条件下，土的性质、炸药不变，不延时，单药包的情

况下，爆破作用指数仍满足鲍斯列科夫公式： $Q^{1/3} = WK_D f(n)$ (12)
 而 K_D 是与岩石性质有关的系数。

无论岩石还是土，其抛掷堆积都满足弹道运动规律，因而和重力、空气阻力有关。我们通常将漏斗和鼓包运动与抛掷堆积分开来考虑，前者满足几何相似律，在得到速度场和抛角基础上再来考虑堆积问题。从实践来看，堆积一部分是抛掷，另一部分则是往下滚动而成，尤其是在 K_D 值大时更是如此。

文献〔4〕通过试验给出了漏斗中幅线方向各点速度值相同，而不同幅线则满足

$$v_{0i} = A/R_i^2 \quad A \approx 80 \text{ m}^4/\text{s}$$

从模型律来看： $v_i/(E/\rho)^{1/2} = f((Q/\rho_B)^{1/3}/W, R_i/W, \sigma^*/\rho_B E/\rho \dots)$ (13)

如果把介质强度、药量都归到一经验系数 K 上，则 $v_i/(E/\rho)^{1/2} = K f(R_i/W)$

$$f(R_i/W) = K_1 (W/R_i)^3 \quad v_i = K_1 \cdot (E/\rho)^{1/2} \cdot (W/R_i)^3 \quad (14)$$

而文献〔7〕中： $A = K_1 \cdot (E/\rho)^{1/2} \cdot W^3$ ，说明 A 是抵抗线、声速、强度的综合量。如果纯粹的抛掷堆积，在忽略空气阻力条件下，独立物理量为 v_{0i} 和 R_i 、 n 、 H （药室高度）、 W 及 g ，则抛角可由 H 、 n 、 R_i 确定。

$$\text{抛距 } y \text{ 为: } y/W = f(v_{0i}^2/gH, H/W, n) \quad (15)$$

$$\text{堆高 } h \text{ 为: } h/W = F(v_{0i}^2/gH, H/W, n) \quad (16)$$

由于试验数据不完整，尚不能整理出确切公式。另外，在滑动爆破筑坝时，由于需要在山体中爆破一滑移线，其相似参数、几何尺寸和摩擦系数 μ 也略有改变，这里不再讨论。

2.2 深孔爆破

深孔爆破在露天开采矿山得到广泛应用，深孔爆破最典型的就是台阶爆破。它与硝室爆破的区别是抵抗线较小，台阶高，药长与抵抗线 W 之比是一个数量级，这样台阶底层的夹制作用较大。台阶爆破关心的爆破效果是岩石块度、爆值的集中、不留根底和边坡稳定。

台阶爆破一般将 W 称为底盘抵抗线， H 是台阶高度， B 是第一排深孔至台阶坡顶的距离，则

$$\text{tg} \alpha = H/(W - B) \quad (17)$$

这样选择 H 、 B 、 W 为自变量，而 l 是条形药包的长度， d 是药包的直径（在完全偶合的情况下， d 就是钻孔的孔径），此外还有孔距 a 和排距 b 。

对于台阶爆破，延时是一个重要参数。延时顺序一般分两种，一种是前后排延时，另一种是斜线延时，类似V形起爆延时。那么

$$t_{i+1}^* = t_i^* + K_i t_i^*$$

$$\text{延时顺序: } y_{i+1} = y_i + b \quad \text{或} \quad \begin{cases} x_{i+1} = x_i + a \\ y_{i+1} = y_i + b \end{cases}$$

其中： K_i 是 i 孔的延时系数， x_i 、 y_i 则是孔的坐标位置。

这样深孔爆破的独立物理量为： ρ_B 、 D 、 γ 、 q （单位长度药量）、 E 、 μ 、 σ^* 、 D_1 、 ρ 、 t_i^* （延时的特征量）、 a 、 b 、 W 、 B 、 H 、 l 。共有13个有量纲的独立物理量， γ 、 D_1 、 μ 是三个无量纲量。根据II定理可组成10个无量纲的相似参数：

$$\frac{\rho_B}{\rho}, \frac{(E/\rho)^{1/2}}{D}, \frac{(q/\rho)^{1/2}}{W}, \frac{\sigma^*}{\rho_B D^2}, \frac{t_i^*}{b/(E/\rho)^{1/2}}, \frac{B}{W}, \frac{H}{W}, \frac{a}{W}, \frac{b}{W}, \frac{l}{W} \text{ 以及 } \gamma, D_1, \mu.$$

因此任何一个标志爆破效果的无量纲量，都是上述相似参数的函数。

以下对爆破效果的物理量作些讨论，爆破块度一般以 $R-R$ 分布函数来确定。

$$p = \{1 - \exp(-d/d_0)^n\} \times 100\% \quad (18)$$

其中 p 是岩块特征尺度 d 累计的百分数，而 d_0 的含义为： $p = \{1 - (1/e)\} = 63.21\%$ 的岩块特征尺寸。因此只要定下 d_0 和 n ，则所有岩块尺寸的百分比均知道，这样可求得大块率。所以 d_0 和 n 是爆破效果标志的两个独立物理量。那么

$$\frac{d_0}{W} = f_1\left(\frac{\rho_0}{\rho}, \frac{(q/\rho)^{1/2}}{W}, \frac{(E/\rho)^{1/2}}{D}, \frac{\sigma^*}{\rho_B D^2}, \frac{t^*}{b/(E/\rho)^{1/2}}, \frac{B}{W}, \frac{H}{W}, \frac{a}{W}, \frac{b}{W}, \frac{l}{W}, \gamma, D_1, \mu\right) \quad (19)$$

$$n = f_2\left(\frac{\rho_B}{\rho}, \frac{(q/\rho)^{1/2}}{W}, \frac{(E/\rho)^{1/2}}{D}, \frac{\sigma^*}{\rho_B D^2}, \frac{t^*}{b/(E/\rho)^{1/2}}, \frac{B}{W}, \frac{H}{W}, \frac{a}{W}, \frac{b}{W}, \frac{l}{W}, \gamma, D_1, \mu\right) \quad (20)$$

上述都是在满足几何相似律的基础上进行的，忽略重力的影响。而爆破方量 ∇ 为：

$$\frac{\nabla}{HW^2} = f_3\left(\frac{\rho_B}{\rho}, \frac{(q/\rho)^{1/2}}{W}, \frac{(E/\rho)^{1/2}}{D}, \frac{\sigma^*}{\rho_B D^2}, \frac{t^*}{b/(E/\rho)^{1/2}}, \frac{B}{W}, \frac{H}{W}, \frac{a}{W}, \frac{b}{W}, \frac{l}{W}, \gamma, D_1, \mu\right) \quad (21)$$

另外，在实施现场试验炮时，岩石和炸药的参数基本不变，只是通过调整孔距 a 、排距 b 、延时 t^* 来寻求最佳的爆破效果。在 $\frac{H}{W}$ 、 $\frac{B}{W}$ 、 $\frac{l}{W}$ 不变情况下，有：

$$\frac{d_0}{W} = f_1\left(\frac{(q/\rho_B)^{1/2}}{W}, \frac{t^*}{b/(E/\rho)^{1/2}}, \frac{a}{W}, \frac{b}{W}\right) \quad (22)$$

$$n = f_2\left(\frac{(q/\rho_B)^{1/2}}{W}, \frac{t^*}{b/(E/\rho)^{1/2}}, \frac{a}{W}, \frac{b}{W}\right) \quad (23)$$

由此得出结论，如果实施高台阶爆破，比现有台阶高度增加50%的量，即增加1.5倍，在同样地质和炸药条件下， H/W 不变，即 W 增加1.5倍，则 a 、 b 、 l 、 B 都增加1.5倍，这时单位长度药量 q 增加2.25倍，总药量增加3.375倍前提下，爆破效果 d_0 也增加1.5倍，这样大块率就要增加。因此如在现有台阶爆破能做到 d'_0 ，而 $d_0 = 1.5d'_0$ ，那么在高台阶爆破情况下，可达到同样大块率的效果。

对于延时的讨论，延时是和大块率密切相关的。如 d_0/W 一定， H/W 、 a/W 、 b/W 不变情况下：

$$\frac{t^*}{W/(E/\rho)^{1/2}} = f\left(\frac{(q/\rho_0)^{1/2}}{W}, \frac{l}{W}\right) \quad (24)$$

$$\text{这时有一经验公式：} \tau = (W/c_p) + 2.45Q^{1/3} + 3.843 \times 10^{-2} (W^2 \gamma_0 / \phi) \quad (25)$$

式中： c_p 是岩石的波速， $c_p = (E/\rho)^{1/2}$ ； γ_0 是容重； ϕ 是孔径，则上式可改写成：

$$\frac{\tau}{W/c_p} = 1 + 2.45 \times \frac{1}{W/c_p} \cdot Q^{1/3} + 3.843 \times 10^{-2} \cdot \frac{W^2 \gamma_0}{\phi} \cdot \frac{1}{W/c_p}$$

由于 $Q = l \cdot q$ $\rho_B \phi = q$

$$\text{则 } \frac{\tau}{W/c_p} = 1 + K_1 \left(\frac{l}{W}\right)^{1/3} \left(\frac{q/\rho_B}{W^2}\right)^{1/3} + K_2 \left(\frac{q/\rho_B}{W^2}\right)^{-1}$$

$$K_1 = 2.45 \left(\frac{1}{W/c_p}\right) \rho_B^{1/3} W \quad K_2 = 3.843 \times 10^{-2} \cdot (\gamma_0 / \rho_B) \left(\frac{1}{W/c_p}\right)$$

这样 K_1 和 K_2 是两个无量纲量。如 l/W 为定值，则

$$\frac{\tau}{W/c_p} = K_1 \left(\frac{q/\rho_B}{W^2} \right)^{1/3} + K_2 \left(\frac{q/\rho_B}{W^2} \right)^{-1} + 1 \quad (26)$$

由上式可求出最佳延时时间， $d\left(\frac{\tau}{W/c_p}\right) = 0$ ，即

$$\frac{1}{3} K_1 \left(\frac{q/\rho_B}{W^2} \right)^{-2/3} - K_2 \left(\frac{q/\rho_B}{W^2} \right)^{-2} = 0 \quad (27)$$

$$\frac{1}{3} K_1 \left(\frac{q/\rho_B}{W^2} \right)^{1/3} - K_2 = 0 \quad \text{则} \quad \left(\frac{q/\rho_B}{W^2} \right) = \left(3 \cdot \frac{K_2}{K_1} \right)^{3/4}$$

$$\text{将 } \frac{q/\rho_B}{W^2} \text{ 代入，} \quad \frac{\tau^*}{W/c_p} = K_1 \cdot \left(3 \cdot \frac{K_2}{K_1} \right)^{1/4} + K_2 \cdot \left(3 \cdot \frac{K_2}{K_1} \right)^{3/4} + 1 \quad (28)$$

式(28)为最佳延时时间。这些可以作为参考。

类似深孔的预裂爆破、光面爆破都可作类似的相似准则。

2.3 水下爆破

水下爆破，经常碰到的是水下炸礁、航道疏浚、水库的围堰爆破拆除，以及岩塞爆破等，一般方量都不大，但是在采用水上钻孔法时，增大了施工难度。

从爆破方法分，有裸露爆破和深孔爆破。水介质有4个独立物理量，即： ρ_w （水密度）、 a （水声速）、 n 、 H （水深）。裸露药包一般耗药量较大，如 L^* 为礁石的特征尺寸，则其独立物理量为： ρ_B 、 D 、 γ 、 Q 、 E 、 μ 、 ρ 、 σ^* 、 L^* 、 ρ_w 、 a 、 n 、 H

其中有10个有量纲的独立物理量，根据 Π 定理，可组成7个无量纲的相似参数为：

$$\frac{\rho_B}{\rho}, \frac{\rho_w}{\rho}, \frac{(Q/\rho_B)^{1/3}}{H}, \frac{H}{L^*}, \frac{(E/\rho)^{1/2}}{D}, \frac{(E/\rho)^{1/2}}{a}, \frac{\sigma^*}{\rho_B D^2}, \gamma, n, \mu$$

任何一标志爆破效果的物理量无量纲参数，都是上述无量纲相似参数的函数，如爆破漏斗 L

$$\frac{L}{L^*} = f\left(\frac{\rho_B}{\rho}, \frac{\rho_w}{\rho}, \frac{(Q/\rho_B)^{1/3}}{H}, \frac{H}{L^*}, \frac{(E/\rho)^{1/2}}{b}, \frac{(E/\rho)^{1/2}}{a}, \frac{\sigma^*}{\rho_B D^2}, \gamma, n, \mu\right) \quad (29)$$

在炸药、地质条件和水介质不变情况下，忽略重力的影响，则

$$L/L^* = f\left(\frac{(Q/\rho_B)^{1/3}}{H}, H/L^*\right) \quad (30)$$

而钻眼爆破 L^* 可定为最小抵抗线 W ，则

$$L/W = f\left(\frac{(Q/\rho_B)^{1/3}}{H}, H/W\right) \quad (31)$$

讨论一下 H/W ，实际是水深与抵抗线相比，水深代表静水压，因此爆破漏斗等爆破效果一般是与 H/W 成反比。

水下爆破最近以来发展了爆炸处理水下软基（置换法）的技术，有爆炸排淤填石法、爆夯法和堤下爆炸挤淤法。

我国沿海多有淤泥等软土，不能承载，多用置换法，水下抛石来置换软土。爆破开沟，在瞬时是可行的，但很快回淤，无法填石块，不能达到置换的要求，必须采用瞬态置换的方法。

爆炸排淤填石法, 是将堆石体抛填在堤头, 将炸药(常用群药包)埋在堆石体前方一定距离和一定深度的淤泥内, 爆炸产生爆坑, 将药包位置上及其附近的覆盖水和淤泥上抛飞散, 堆石体的前端向下塌落至爆坑内; 然后继续填石形成一个完整的堤。

爆夯法, 是将炸药放在覆盖堆石体的水中, 堆石体下方的淤泥与持力土层相连接, 爆炸压力使堆石体向下运动, 为了保持平面爆夯, 用点阵式布药, 爆后, 淤泥从堆石体两侧向上方挤出。

堤下爆炸挤淤法, 是将条形药包(或多个集中药包)埋在堆石体淤泥中或淤泥表面, 爆后, 爆炸压力将淤泥从堆石体两侧挤出, 堆石体下形成空腔, 在重力作用下堆石体落入爆炸空腔内。

这和土岩爆破不同, 淤泥是一种饱和强度很低的介质, 在爆炸载荷下, 强度不起作用, 如同流体。堆石体是一散体, 能承受较大的压载, 但对振动是很敏感的, 振动能使堆石体密实。堆石体的运动状态(如滑动)可用水力学方程来描述, 一般采用格列戈扬方程, 将其一维的方程描述如下:

$$\rho F \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} \right) = \rho g F \sin \varphi - L \frac{\partial}{\partial S} \left(\frac{1}{2} \rho a \frac{F^2}{L^2} \right) - L f \rho u \frac{F}{L} \operatorname{sinh}(u) - K \rho u^2 L \operatorname{sinh}(u)$$

$$(\partial F / \partial t) + \partial (FS) / \partial S = 0 \quad (32)$$

其中阻力为摩擦阻力和水力学摩阻之和, 水力学摩阻为 $K \rho u^2 F (L/F)$, 摩擦阻力为 μa , 而 $a = g \cos \varphi + (u^2/R)$ 。式中 F 是横断面面积, u 是速度, L 是横断面的特征尺寸, S 是沿滑移面的弧长, 采用的是自然坐标。

以上是流动的情况下产生的, 而在爆炸力直接作用在石体上时, 使得堆石体相互错动, 堆石体密度增加, 一般应满足:

$$p/p_0 = K_1 [1 - (\rho/\rho_0)]^m \quad (33)$$

其屈服极限为: $\phi = \sigma \operatorname{tg} \phi_0$

现讨论独立物理量。堆石体在非滑动情况下的独立物理量有: ρ_0 (密度)、 H (堆石体高度)、 L (堆石体底宽)、 ϕ_0 、 K_1 、 m 。而在滑动情况下有: ρ_0 (密度)、 H (堆石体高度)、 μ (内摩擦系数)、 S_0 (弧长)、 α_0 (堤头坡角)、 R_0 (曲率半径)、 K_0 (水阻系数); 而 K 是不敏感值, 约为 0.05, 可略之。

淤泥仍是宾汉体, 淤泥的物理不变量则为: ρ_s 、 H_s (淤泥深度)、 c 、 φ 、 τ_0 、 a (淤泥的粘滞力)。因而在爆夯等不滑动情况下为: ρ_w 、 D 、 γ 、 q 、 ρ_0 、 H 、 L 、 K 、 m 、 ρ_s 、 H_s 、 c 、 φ 、 τ_0 、 a 、 H_w 、 a 、 n 、 ρ_w 。其中有 6 个是无量纲量, 还有 14 个有量纲量, 可组成 11 个无量纲的相似参数, 在爆夯条件下 q 是单位面积的药量。

$\frac{\rho_w}{\rho_s}$, $\frac{\rho_0}{\rho_s}$, $\frac{\rho_w}{\rho_s}$, $\frac{q/\rho_w}{H_s}$, $\frac{H_w}{H_s}$, $\frac{H}{H_s}$, $\frac{L}{H_s}$, $\frac{c}{\rho_w D^2}$, $\frac{\tau_0}{\rho_w D^2}$, $\frac{a}{D}$, $\frac{a}{\tau_0 a_0 / H_w}$, 再加上 γ , φ_0 , K , φ , m , n 。

如果炸药、淤泥、堆石体不变, 则表示爆破效果的堆石体下沉量 Δ 为:

$$\frac{\Delta}{H_s} = f \left(\frac{q/\rho_s}{H_s}, \frac{H_w}{H_s}, \frac{H}{H_s}, \frac{L}{H_s} \right) \quad (34)$$

实践证明,当水保持一定深度(即 $\frac{H_w}{H_s} >$ 某一值)时,对堆石体下沉量 Δ 影响不大,当 L/H 为一定值时:

$$\frac{\Delta}{H_s} = K \frac{(q/\rho_B)}{H_s} \quad (K \text{ 随 } L/H \text{ 变化取不同值}) \quad (35)$$

在爆炸填石排淤法滑动情况下,有以下独立物理量: ρ_B 、 D 、 γ 、 q 、 ρ_0 、 H 、 μ 、 S_0 、 α_0 、 l_0 、 ρ_s 、 H_s 、 c 、 φ 、 τ_0 、 a 、 H_w 、 a 、 n 、 ρ_w , 还有药位,即高坡底的水平距离 d , 这其中有5个无量纲独立物理量,有16个有量纲的独立物理量,组成13个无量纲相似参数:

$$\frac{\rho_B}{\rho_s}, \frac{\rho_w}{\rho_s}, \frac{\rho}{\rho_s}, \frac{H}{H_s}, \frac{H_w}{H_s}, \frac{(q/\rho_B)^{1/2}}{H_s}, \frac{d}{H_s}, \frac{D}{a}, \frac{\tau_0}{\rho_0 D^2}, \frac{c}{\rho_0 D^2}, \frac{S_0}{H_s}, \frac{R_0}{H_s}, \frac{a}{\tau_0 a_0 / H_w}$$

在淤泥、炸药、堆石体不变情况下,爆炸效果即堆石体下滑最大位移值为 Δ :

$$\frac{\Delta}{H_s} = f\left(\frac{(q/\rho_B)^{1/2}}{H_s}, \frac{d}{H_s}, \frac{H_w}{H_s}, \frac{H}{H_s}, \frac{S_0}{H_s}, \frac{R_0}{H_s}\right) \quad (36)$$

在一定水深条件下,一般影响不大,实验获得 $\frac{(q/\rho_B)^{1/2}}{\Delta H_s} = \text{常数}$,满足能量准则。随 H/H_s 不同,常数值不同。所以爆炸置换和爆夯是满足几何相似律和能量准则。

3 模型材料的讨论

我们常常除在现场做实验炮外,也需要在实验室进行模型试验,模型尺寸在大于30倍时,必须考虑动力相似和几何相似。在分析相似参数的基础上选取适当材料,才能保证相似,否则试验室的模型试验所选取的参数就失去参考意义。

上面谈到在放大倍数较大时,药量 Q 应用能量 E 代替,由于在爆破中常用条形药包,所以能量常用单位长度能量 e 作为独立物理量。除几何相似量外,主要是用两个相似参数来控制 $e/\rho g H^3$ 和 $e/\sigma H^2$ 。首先分析 $e/\rho g H^3$,再分析 $e/\sigma H^2$ 。如果大型试验是小模型的 n 倍,则能量(单位长度)放大 n^3 倍。由于 H 放大 n 倍,而 e 放大 n^3 倍,所以 σ 也要放大 n 倍,反之则缩小 $1/n$ 倍。无量纲独立物理量 $\sigma/\rho_B \cdot D^2$ 中,若 σ 缩小 n 倍,则 $\rho_B D^2$ 相应也要缩小 n 倍。因此必须选择低密度、低爆速的炸药。

从中国科学院力学研究所以往的工作来看,选择石膏和小石子配方作材料,强度从0.3 MPa到3.3 MPa;用海绵炸药密度从0.15g/cm³到0.29g/cm³,爆速从1931m/s到2605m/s。按上述方法选取参数,可以在模型试验时达到理想的效果。

4 讨 论

(1)研究模型律必须要认识整个物理过程,有时也要借助于物理方程来选定独立物理量。

(2)几何相似律普遍存在,与时效相关的重力和应变率,只是在一定时间后才能起明显的作用,因此重力等原则上是一个时间的尺度。

(3)放大倍数不大时,可用药量 Q 或 q 作为独立物理量,而放大倍数较大时,或作用时间较长时,用能量 E 或 e 作为独立物理量。

(下转第15页)

5 结 语

由于BMMC模型作了诸多假设,因而模型的数学描述与小台阶爆破的实际存在一定的偏差。这是模型与实测存在误差的根本原因。本文的修正并未触及模型的原有假设,因而仍不能完全消除模型的缺陷。更为准确的模型仍是理论界需解决的一个难题。

由于分形是自然界中广泛而普遍的现象,岩石也不例外。考虑面分形后的BMMC模型可以克服原模型倾向大块端的缺陷,使模型更接近实际。本文的方法可供生产实践作参考。

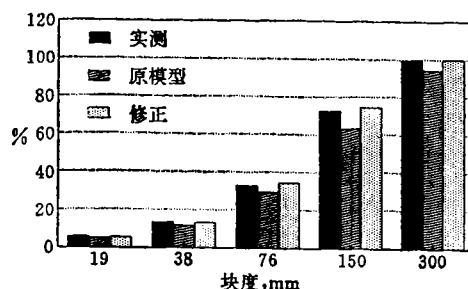


图2 块度理论预测结果与实测值的比较

Fig.2 Comparison between results of experiment and theoretical prediction of block size
($0ms, 38 \times 57cm, D_s = 2.0^{\circ}$)

参 考 文 献

- 1 邹定祥. 露天矿台阶爆破矿岩破碎过程的三维数学模型. 马鞍山矿山研究院, 1983.
- 2 高金石, 张奇. 爆破理论与爆破优化. 西安: 西安地图出版社. 1993, 189~190.

(上接第10页)

(4) 最小抵抗线 W 实际是一几何特征尺寸, 如有多种特征尺寸时, W 则不是唯一的几何特征。

(5) 爆破效果必须要有明确物理量来描述, 否则很难利用模型律。

(6) 当 q 和位移量成线性关系时, 一般满足能量准则。

(7) 所有经验公式, 通过量纲分析, 相似准则应该变成无量纲形式。

参 考 文 献

- 1 郑哲敏, 杨振声等. 爆炸加工. 北京: 国防工业出版社, 1981.
- 2 许连坡. 关于爆破相似律的一些问题. 爆炸与冲击, 1985, 5(4).
- 3 杨秀敏, 金骥良, 刘殿中. 土壤内集中药包爆破漏斗特性的数值分析. 爆炸与冲击, 1984, 4(1).
- 4 刘殿中, 王中黔. 鼓包运动和抛掷堆积. 爆炸与冲击, 1983, 3(3).
- 5 许连坡. 龙盘山大爆破鼓包发展过程的摄影观测. 爆炸与冲击, 1983, 3(3).
- 6 冯叔瑜, 朱忠书, 马方耀. 体积平衡法. 工程爆破文集. 北京: 冶金工业出版社, 1980.
- 7 黄元清. 爆破介质抛掷运动的观测与研究. 工程爆破文集. 北京: 冶金工业出版社, 1980.
- 8 长沙矿冶研究院等. 首钢水厂铁矿大区微差爆破技术的研究, 1990.
- 9 郑哲敏, 杨振声, 金缪. 爆炸处理水下软基. 工程爆破文集第四辑, 1991.
- 10 杨振声, 周家汉等. 滑动爆破筑坝模型律与模型材料, 1990.