

# 岩土爆破理论与实验研究新进展

寇绍全 张宗贤 冯铭瀚 许潮水

(北京钢铁学院)

**提要** 本文针对当前爆破工程中的大抵抗线, 爆破块度, 裂纹控制以及安全等急待解决的问题, 总结了爆破理论与实验研究的最新进展。

**关键词** 爆破; 相似模拟; 断裂力学; 裂纹控制; 安全

现在, 岩土爆破在我国已遍地开花, 普通爆破的设计与施工方法已经比较普及。然而, 建设规模的扩大, 切割要求的提高, 导致工程难度相应增加。实际工程提出了大抵抗线爆破、高精度切割、高效率施工、安全可靠、低能耗等更高的要求。要适应新形势, 必须加强爆破理论的研究。[1]对岩石力学性质的研究及促进爆破技术的发展进行了综述。本文针对大抵抗线、块度、裂纹的数量和长度的有效控制、爆破振动安全等问题, 总结近年来理论和实验研究的进展。中心是力学在岩土爆破中的应用。内容尽可能接近工程实践中急待解决的问题。

## 1. 爆破漏斗的相似模拟

岩土爆破漏斗的形成是一个非常复杂的力学过程。它与重力效应, 岩土强度特性及瞬态加载条件相互作用有关。采用量纲分析方法可以不必考虑每一个力学细节, 先从物理量的联系上得到一般性的结论, 从而指导试验的设计和结果的分析。

用量纲分析研究工程问题最近的典型例子是[2]。[3]是用量纲分析研究岩土爆破的例子。本文将主要介绍 Chabai<sup>[4]</sup>, Baker 和 Westine<sup>[5]</sup> 等人对此问题的理论分析及实验结果。量纲分析的关键及难点在于正确地选择特征参量。爆破漏斗的模拟参量可概括为表1。

表1 爆破漏斗模拟参量

参 量	符 号	基本量纲	选 择 理 由
炸 药 能	$W$	FL	载 荷
埋 深	$H$	L	几何尺寸
漏 斗 半 径	$R$	L	效应参数
材 料 密 度	$\rho$	$FT^2/L^4$	惯 性
强 度	$\sigma$	$F/L^2$	本构关系
自重梯度参数	$G$	$F/L^3$	重力影响

因为岩土材料的压力梯度随深度线性增加，所以表1用力/长度<sup>3</sup>为量纲的常数 $G$ 来代表重力影响。问题包含6个物理量，3个独立量纲，因而可以组成3个无量纲量。6个量中只有代表惯性的 $\rho$ 包含有时间 $T$ ，所以 $\rho$ 应该消去，即爆破漏斗尺寸与惯性无关。从而得到

$$R/H = f(W^{1/3}/\sigma^{1/3}H, W^{1/4}/G^{1/4}H) \quad (1)$$

方程(1)给出了一个三维关系。它说明因变量(无量纲漏斗半径)几何相似的条件。两个自变量都是能量比，分子都是炸药能释放的大小。第一个自变量的分母由单位体积的应变能来确定。第二个则取决于克服重力影响所消耗的能量。

可见鲍列斯科夫<sup>[6]</sup>公式是在假定重力影响不重要的前提下，略去第二个自变量，从而将式(1)给出的三维关系变成 $R/H-W^{1/3}/\sigma^{1/3}H$ 的相关问题。图1是在干冲积土中的实验结果。因为土质相同， $\sigma$ 可当成常数而略去。图1中的炸药从1.14 kN的普通TNT炸药变化到TNT当量为 $8.9 \times 10^5$  kN的核炸药，变化了近6个量级。从图1可以看到，如果对小炸药量的试验结果使用相似律来推算大药量形成的弹坑，特别是 $4.45 \times 10^3$ 和 $8.9 \times 10^5$  kN的情况，则会高估弹坑半径。因而，在抵抗线较大时，忽略重力影响是不那么对的。

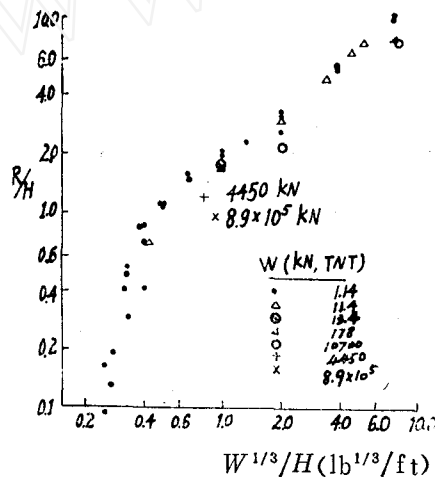


图1 冲积土中的  $R/H-W^{1/3}/H$  关系

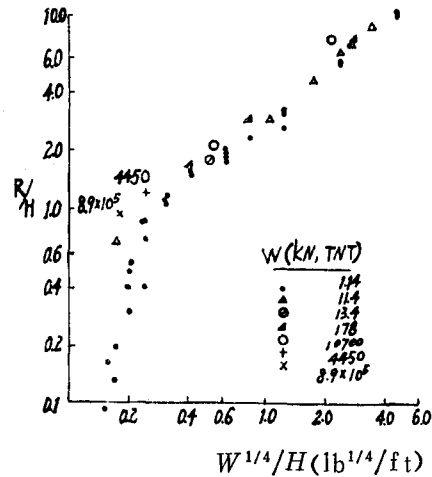


图2 冲积土中的  $R/H-W^{1/4}/H$  关系

相反，假定强度的影响与重力影响相比可以忽略，方程(1)变成了 $R/H-W^{1/4}/G^{1/4}H$ 的二维关系。图2是把图1中的资料按 $R/H-W^{1/4}/H$ 整理的。由图可见，如果按小药量的试验结果用图2来预报大药量的弹坑，则会预报得过小。

Chabai<sup>[4]</sup>用回归分析得到了一个关系 $R/H-W^{1/3.4}/H$ 。他用 $W^{1/3}/\sigma^{1/3}H$ 作为纵坐标， $W^{1/4}/G^{1/4}H$ 为横坐标，这时与无量纲漏斗尺寸为常数对应的线是双曲线。双曲线方程的参数是 $R/H$ 的函数。这个经验观察说明方程(1)可以写成

$$\frac{R}{H} = f\left(\frac{W^{1/3}}{\sigma^{1/3}H} \times \frac{W^{1/4}}{G^{1/4}H}\right) = f\left(\frac{W^{7/12}}{\sigma^{1/3}G^{1/4}H^2}\right) = f'\left(\frac{W^{7/24}}{\sigma^{1/8}G^{1/8}H}\right) \quad (2)$$

图3是用 $R/H-W^{7/24}/H$ 重新整理图1中的资料所得结果，其相关性较单独用 $W$ 的 $1/3$ 或 $1/4$ 幂律都好。有趣的是， $7/24 \approx 1/3.43$ 非常接近统计回归结果的 $1/3.40$ 。

$\rho g$ 和 $\rho c^2$ 分别与 $G$ 和 $\sigma$ 有相同的量纲，其中 $g$ 为重力加速度， $c$ 为材料的声速。因此，

$W^{1/4}/(\rho g)^{1/4}H$  和  $W^{1/3}/(\rho c^2)^{1/3}H$  可分别与  $W^{1/4}/G^{1/4}H$  和  $W^{1/3}/\sigma^{1/3}H$  对应。假设这种对应是线性的，从而可将式 (2) 改写成

$$R/H = f' [W^{7/24}/(\rho^{7/24}g^{1/8}c^{1/8}H)] \quad (3)$$

Johnson 等<sup>[5]</sup>在砂箱中，改变埋深和重力加速度得到了一系列实验结果，如图 4。图 4 说明  $\rho g$  是  $G$  最好的代表，重力加速度服从  $1/8$  次方定律。联系图 4 与式 (3) 可以看出，无论密度，重力加速度  $g$ ，声速  $c$  对弹坑尺寸的影响都是有限的。

图 5 是在 5 种性质完全不同的岩土材料中得到的无量纲漏斗尺寸及炸药量的关系，5 种材料的比重和声速如图中附表所示。图 5 虽然只有 5 种材料，但性质却变化很大，然而，离散并不严重。

通过上述分析我们还可以得到如下结论：

①如果重点是从漏斗尺寸来考察爆破效果，则现场

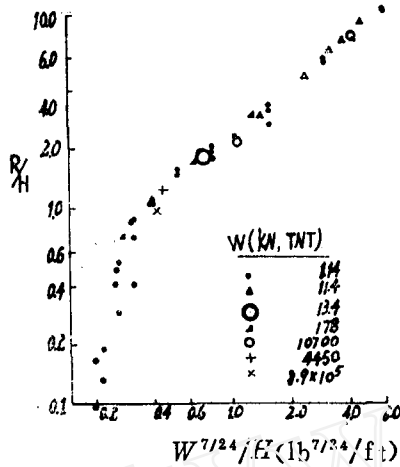


图 3 冲积土中的  $R/H-W^{7/24}/H$  关系

场岩石的分类指标可采用  $\rho c^2$ 。

②图 3 中的点可用两条直线来近似。对于  $W^{7/24}/H$  大于 0.3 的值可用一个中等大小斜率的直线来逼近，而小于 0.3 的区域则用一条非常陡的线来代表。这说明当  $W^{7/24}/H < 0.3$  时，无量纲半径对自变量的小变化也是敏感的。因此，它在这段较分散，对实验精度要求也较高。而在  $W^{7/24}/H > 0.3$  的区域，实验条件则比较容易控制。

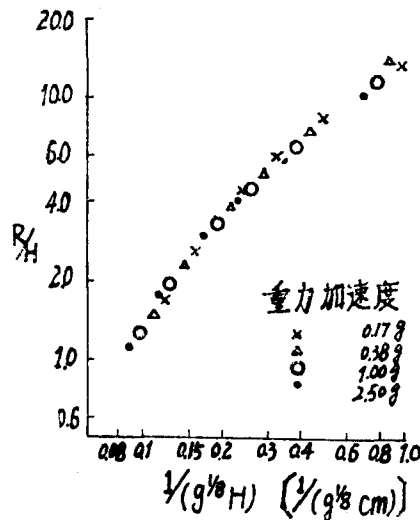


图 4 砂中  $R/H-1/g^{1/8}H$  关系

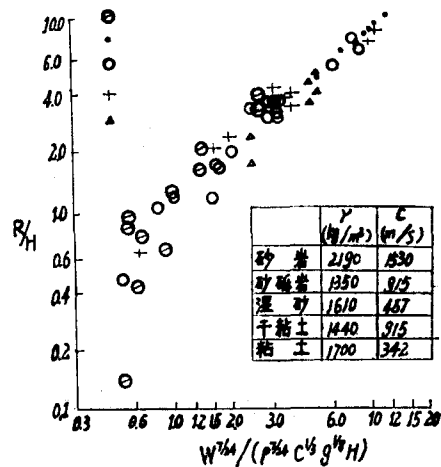


图 5 不同岩土中  $R/H-W^{7/24}/(\rho^{7/24}c^{1/3}g^{1/8}H)$  关系

③方程 (3) 及图 5 给出了不同岩土条件、不同埋深的爆破漏斗尺寸的一般解。这说明用模型试验能够预报能量快速释放形成的弹坑。试验中几何相似要满足，但炸药量要按式 (3) 变化。如果模型和原型采用同样的材料，试验又在同一重力场中进行，则用于模型试验的炸药量相对于原型要减少，其比值的  $7/24$  次幂正好与几何尺寸比相当，

## 2. 爆破块度问题

现在考察弹坑之外，爆炸波对均匀完整材料和节理裂隙岩体所产生的破坏。

浅埋炸药在均匀材料中爆炸后产生两类弹性体波，纵波(P)和横波(S)，经过边界反射后则有PP, PS, SP, SS波。在理论分析中，由于问题被假定成轴对称的，得不到剪切波。但由于孔壁压碎、裂纹的出现，破坏了问题的对称性，无论现场或实验室总可测到S波。假设在等效空腔壁上作用了一个压力脉冲 $p(t)$ ，壁上任一位置的应力随时间变化如图6<sup>[10]</sup>。从图6可以看到，准静态解与动态解是不完全相同的。在动载情况下，开始时所有主应力都是压的，几乎无压碎发生。之后，周向应力改变符号，剪应力达一定值后，压碎区形成。压碎区在径向向外传播，一直到应力衰减到引起压碎的临界应力值以下才停止。压碎区外的裂纹是由拉伸引起的，是周向应力引起的，是径向裂纹。

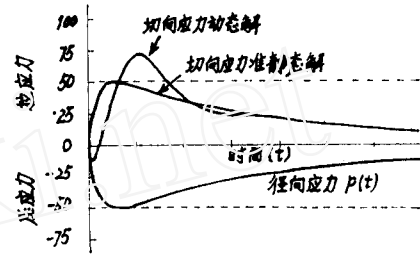


图6 压力脉冲 $p(t)$ 产生的准静态及动态孔壁应力

事实上，岩石材料总是充满了缺陷，垂直于拉应力的那些缺陷首先形成裂纹。对裂纹扩展的分析必须借助断裂力学。描述裂纹尖端应力场奇异性大小的一个量——应力强度因子 $K$ ，是线弹性断裂力学的基础。 $K$ 依赖于载荷的配置及裂纹的几何尺寸。无论在快速断裂、疲劳裂纹扩展、应力腐蚀开裂及裂纹分叉中， $K$ 都是控制断裂的参数。当 $K$ 达到一个与材料特性有关的值 $K_c$ 时，裂纹将要扩展。有关金属材料的试验证明，在一定范围内 $K_c$ 变化较小<sup>[7]</sup>，而加载

速率较高时 $K_c$ 下降，材料变脆(图7)<sup>[8]</sup>。爆炸载荷属强动载荷，因而有必要利用高加载速率下岩石的断裂韧性来分析问题。在目前，这方面的资料短缺的情况下，本文仍利用静态 $K_{Ic}$ 。裂纹一旦扩展，它将沿垂直于最大拉应力的方向传播，直到应力场产生的 $K \leq K_{Ic}$ 。这里 $K_{Ic}$ 为裂纹停止时的断裂韧性。Oucterlony<sup>[9]</sup>指出，所有裂纹要在径向方向均匀成长是不可能的，从密集裂纹区将要形成一些主裂纹，它们以牺牲短裂纹为代价向外扩展。

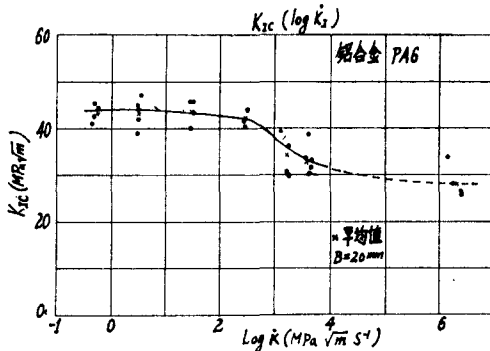


图7 铝合金PA6的断裂韧性 $K_{Ic}$ 随加载速率 $K_1$ 的变化

当裂纹扩展的能量释放率达到分叉所需值时，裂纹分叉。或者说，裂纹尖端的应力强度因子超过分叉时的断裂韧性 $K_{Ib}$ 时，裂纹分叉。主裂纹从压碎区一脱出就要分叉，因为较短的临近裂纹减少了。Fourney<sup>[10]</sup>等人的试验证实了这一点。爆破中一个引起裂纹分叉的普遍原因，是应力波从自由边界反射回来与正在向外传播的裂纹相互作用，另一种情况是相邻孔爆炸所产生的应力波与正在运动的裂纹相互作用。其共同点是后续应力波使运动裂纹尖端的 $K_d$ 增加，致使 $K_d > K_{Ib}$ 。分叉的结果是块度减小。这种分叉常被称作障碍分叉。裂纹传播的方式是运动—进入障碍—分叉，以后又在径向继续传播。这种现象对于破岩是非常重要的，一旦这个波过去后，有时分叉就停止了，驱动裂纹继续向前的将是后续波。PS, SP波

使裂纹分叉的理由也类似。

炮孔周围的小裂隙对爆破的影响是很小的，因为应力波很强。远离炮孔的小裂隙对裂纹的传播有很明显的影响。PP 和 PS 的共同作用可使离炮孔很远的自由面附近形成裂纹。P 波波尾和 S 波共同作用形成的裂纹一般是不在径向传播的。岩体中的节理对破岩的影响是突出的，大量的裂纹开始于节理上，且是由于剪切造成的。

本文讨论裂纹分叉的目的是为了研究爆破块度。为了获得最佳块度还需正确地估计多个炮孔相互间的起爆延迟时间。定义平均块度  $F_{av}$  为

$$F_{av} = \left( \sum_{i=1}^n X_i W_i \right) / \left( \sum_{i=1}^n W_i \right) \quad (4)$$

其中  $X_i$  是第  $i$  到  $i-1$  个筛孔尺度的平均， $W_i$  是第  $i$  个筛留下来的块度的总重量。通过模

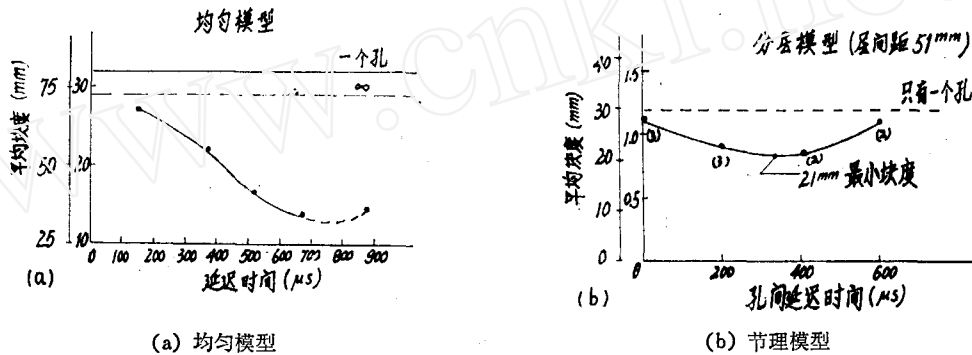


图 8 块度与延迟时间的关系

型试验，Fourney<sup>[11]</sup> 得到了块度随延迟时间的分布如图 8。成层介质的块度比均匀介质的块度小，这是容易理解的。在有节理的岩石中，延迟时间对最佳块度尺寸更关键，成层介质获得最佳块度所需延迟时间更短。一旦超过这个最佳时间，块度增加更快，延迟时间事实上也不可能太长，否则第二个孔将不完整。

### 3. 爆破裂纹的控制

有效地控制裂纹的发生位置，传播方向，开裂长度是当前石料开采、地热开发、油井激活、瓦斯抽放等工程问题的关键。

预裂爆破和光面爆破是最早用来控制裂纹发展的爆破方法。光面爆破采用不耦合装药，延迟起爆，减少了地震；而预裂爆破则引起应力的叠加，增强了地震。科学发展到了今天，断裂力学取得了惊人的进展，利用断裂力学的原理控制裂纹的发展已成为可能。

从断裂力学的观点来看，要控制爆破裂纹，必须控制炮孔孔形，或作用在孔壁上的载荷，或两者兼有。并且对载荷或孔形的任何有效的改变都必须在断裂开始之前。风靡一时的空孔法不能起到保护围岩的作用，因为波到达空孔之前，空孔对断裂模式不发生任何影响；波到空孔后装药孔周围的径向裂纹又业已形成。

Oucterlony<sup>[9]</sup> 研究有  $n$  条径向裂纹的圆孔在内压作用下的开裂，发现当裂纹很短时，例如  $a \leq 0.05R$  ( $R$  为孔半径， $a$  为裂纹深度)，裂纹开始扩展的临界压力与裂纹数无关：

$$p_c = K_{1c} / (2.24\sqrt{\pi a}) \quad (5)$$

岩石的  $K_{1c}$  约在  $0.18-15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  之间，因而很低的压力就可以使裂纹开始扩展。例

如, 石灰岩中切口深度为 0.5mm 时, 压力超过 10.3 MPa 即开始扩展。花岗岩中同样深的切口约需 24.8 MPa。这是裂纹开始的最小压力。

经验证明孔内压力太高时, 孔壁要形成很多裂纹, 其原因在于天然微裂隙扩展了。这不仅对保护待切割的岩石不利(这在大理石石料开采中是很关键的问题), 而且由于孔壁压碎, 爆炸产物气体不可能进入张开的裂纹, 因而应力强度因子  $K$  随裂纹长度增加很快就衰减了。如能避免这种情况, 则孔间距可以大大增加。假定岩石中天然微裂隙的长度为  $a_f$ , 则由式 (5) 可以求得使天然裂隙扩展的最小压力, 这也是孔壁不出现大量无规裂隙的极限压力。经验表明, 天然微裂隙的长度可以取为岩石的颗粒尺寸。因而, 有三个特征量  $K_{Ic}$ ,  $a_f$ ,  $a$ 。例如, 对于花岗岩  $K_{Ic} = 1.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ,  $a_f = 0.025 \text{ mm}$ , 若  $a = 5 \text{ mm}$ , 则使切槽扩展的最小压力为  $p_{min} = 7.6 \text{ MPa}$ , 而要使孔壁不破碎, 炮孔内压力必须小于  $p_{max} = 110 \text{ MPa}$ <sup>[10]</sup>。因此, 对于一个  $K_{Ic}$  和  $a_f$ , 可以选择切槽深度以得到满意的  $p_{max}/p_{min}$ 。由上述例子还可以看出, 从切口处开始裂纹所需的孔压即或对于非常浅的切口也是很低的, 高能炸药爆炸后的爆炸压力为 20 GPa 以上, 比所需压力的 30 倍还大。

使炮孔内压力变低的一种方法是用黑火药、无烟火药和硝化棉等低能炸药; 另一种方法是用不耦合装药。设完全耦合装药的压力为  $p_1$ , 不耦合装药的压力为  $p_2$ ,  $d_1$  为孔径,  $d_2$  为药径, 则应有简单公式

$$p_2/p_1 = (d_2/d_1)^\gamma \quad (6)$$

$\gamma$  是炸药产物气体的绝热指数。[13] 建议  $\gamma$  取为 1.5,  $p_1$  取为爆轰压力的一半。显然应该使  $p_2$  满足

$$p_{max} > p_2 > p_{min} \quad (7)$$

由此可以确定  $d_2$ , 即装药直径或炸药的容重。

上述分析适用于静态或准静态加载的情况, 如膨胀水泥, 缓慢火药燃烧等。静态或准静态加载的缺点是: 除现有节理裂隙外, 不可能创造新裂纹, 因而不可能控制开裂方向。在现场地应力下, 裂纹总是在最大主应力(压为正)方向。在美国 Nevada 试验场的试验<sup>[14]</sup>却给出了非常有趣的结果。试验是在凝灰岩中进行的, 场地上方有 420 m 厚的覆盖层。岩石抗拉强度为 2.8 MPa,  $K_{Ic} = 0.5 \text{ MNm}^{-3/2}$ 。试验中用碳黑来监测裂纹。试验后测量裂纹数目及长度。实验中用三种不同的燃烧剂, 其压力-时间关系如图 9, 有关参数和效果见表 2。试验结果说明, 如果载荷只稍高于现场应力, 且加载速率不高, 则只产生一条裂纹, 且这条裂纹不会传播很远。因为这种情下载荷是难于长期维持的。高加载速率, 高峰压可以产生多裂纹, 裂纹数还依赖于井壁的初始缺陷数及材料的颗粒尺寸, 然而由于压碎区的细沫进入裂隙, 妨碍气体渗入, 从而使裂纹传播的距离减小。因而, 无论峰压和加载速率都既不能太高, 也不能太低, 这就是“裁剪脉冲”。虽然加载速率对裂纹扩展的影响

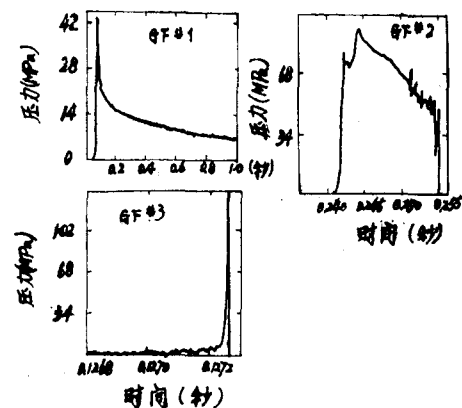


图9 实测的压力时间关系, 时间零点取为点火时刻

机制尚不清楚, Fourney<sup>[12]</sup>等人的实验室研究结果却支持这个现场实验的结论。

表 2 燃烧剂引起的裂纹的情况

型 号	燃 烧 时 间 (ms)	加 载 率 (MPa/s)	峰 压 (MPa)	诱 发 裂 纹 的 情 况	
				条 数	长 度 (m)
GF#1	~900	$6.21 \times 10^2$	43.1	1	0.6—0.9
GF#2	~9	$1.38 \times 10^5$	95.1	12	其中5条小于0.3 其余0.6—2.4
GF#3	~1	$>10.3 \times 10^6$	$>138$	很多条+压碎区	其中一条~1.2 其余<0.12

为要较长时间把压力保持在足够高的水平上,自然会想到增加药量,然而,药量增加后,部分燃烧剂将在高温高压下起作用(因为燃烧剂中压力波速超过燃烧速度),燃烧有可能转成爆轰,从而提高加载压力和速度。此外,加大药量的方法也不经济。因此,解决这一问题的办法仍是堵塞炮孔。

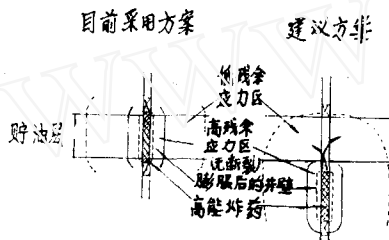


图10 Schmidt等建议的爆破致裂的新方法<sup>[13]</sup>

Fourney<sup>[12]</sup>等人的实验观察到了堵塞带来的新现象,即接近堵塞处的裂纹增长的速率较装药部分还快。沿孔所测的压力时间波形说明堵塞附近高压维持的时间比别的部分都更长。于是堵塞附近的裂纹也就传播得更远。实验还说明这个现象与模型尺寸,堵塞

相对于模型顶部的位置无关。由于堵塞的这种特性, Schmidt等<sup>[13]</sup>设想的油井中爆破致裂的新方法就是很值得一试的。其原理如图10。

#### 4. 爆破振动安全

众所周知,纵波以 $e$ 角入射到自由面上要反射一个P波和出射角为 $f$ 的横波,SV波。同样,S波以 $f$ 角入射到自由面上则要反射SV波和SP波。令P波波速为 $c_1$ ,S波波速为 $c_2$ ,应有

$$c_1 \cos f = c_2 \cos e \quad (8)$$

若令 $e=0$ ,则

$$f_c = \cos^{-1}(c_2/c_1) \quad (9)$$

式(9)说明若S波以临界角 $f_c$ 入射,则在自由面上无SP波反射。或者说,当

$$r < h/\tan(f_c) \quad (10)$$

时,自由面上无SP波。其中 $h$ 为波源到自由面的垂直距离,相当于平地爆炸时的埋深, $r$ 为波源在自由面上的投影至波在自由面上入射点的距离。令 $c_r$ 代表瑞利波速,当

$$r > c_r h / \sqrt{c_1^2 - c_r^2} \quad \text{或} \quad r > c_r h / \sqrt{c_2^2 - c_r^2} \quad (11)$$

时,P波或S波到达自由面时要形成瑞利波。波到达大于 $r$ 的位置的次序是P,SP,SV和瑞利波。

Fourney<sup>[15]</sup>的实验说明,表面爆炸时最重要的是瑞利波。对于有一定埋深的炸药,当 $r/h < 1$ 时,P波最重要; $1 < r/h < 2.5$ 时,P波和瑞利波同等重要,但发生在不同时刻;

$r/h > 2.5$  时, 瑞利波起着决定性的作用。由于P波衰减快, 所以破坏范围不宽, 爆破中S和SP波较小, 对振动贡献小。所有情况下最重要的是位移的径向和垂直分量。对于P波, 近区垂直分量最重要; 对于瑞利波, 近区垂直和径向分量都重要, 远区垂直分量更重要。这些结论理论上和实验上都是一致的。

实际工程问题中当然可以用波动理论算出振动应力和质点速度、位移、加速度, 而用相应的准则来判断安全程度, 可实际上是难于实现的。因而, 借助上述理论建立的物理概念, 利用半经验半理论的方法来建立安全准则仍是必须的。

关于集中药包引起的岩石质点振动速度, 我国工程界积累了相当丰富的经验, 对延长药包引起的振动效应则相对地少些。当炸药尺度比考察点到炮孔间的距离小得很多时, 延长药包引起的峰值质点速度  $u$  遵从如下关系:

$$u = BQ^\alpha / R^\beta \quad (12)$$

$Q$  是药量,  $R$  是距离,  $B, \alpha, \beta$  是常数 (对坚硬基岩<sup>[13]</sup> 建议  $B = 700, \alpha = 0.7, \beta = 1.5$ ,  $Q, R, u$  的单位分别为  $\text{kg}, \text{m}, \text{mm/s}$ )。岩石破坏的临界速度受节理、裂隙的方向影响是很大的, 但表3仍可作为初步分析问题时的参考。图11对于预报振动速度是比较方便的。它给出了不同线装药密度 (图中以单位长度铵油炸药计)、离炮孔不同距离的振动质点速度。给定破坏临界值, 由图11可得安全距离。

表3 岩体损伤的临界振动速度<sup>[13]</sup>

岩石/节理类型	临界速度 (mm/s)
硬岩/节理胶接好	$\geq 1000$
中等坚硬岩石/节理连接弱	800—700
软岩/节理弱连接	$\leq 400$

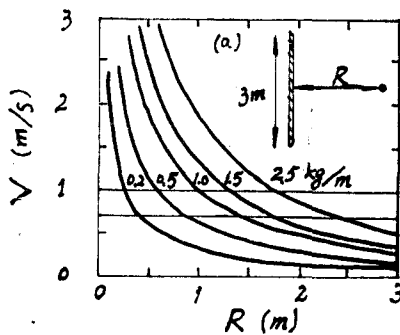


图11 中等坚硬岩石中振动速度作为线装药密度的函数

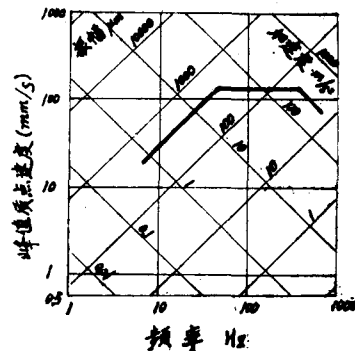


图12 与频率有关的临界振动准则<sup>[13]</sup>

严格说来, 岩体或建筑物破坏的速度准则只在中频范围内适用; 低频范围, 位移准则较为合适; 高频范围, 惯性力显得重要, 应该采用加速度准则, 如图12。图12中的频谱是结构物或岩体的响应谱。频率的决定因素是波长与参与振动的构筑物尺度的相对关系。所谓低频是振动波长比参与振动的岩体尺度大得多的情形, 这时位移是关键量。余此类推。利用图12还应包括一定经验, 要考虑岩体中的主要裂隙、节理、断层密度、强度及方向等工程地质因素。



## 参 考 文 献

- 1 寇绍全, 周家汉. 岩石力学性质的研究和爆破技术的改进. 力学进展, 13, 3 (1983): 336—344
- 2 郑哲敏. 从数量级和量纲分析看煤与瓦斯突出的机理. 力学与生产建设. 北京大学出版社 (1983): 128—137
- 3 许连坡. 关于爆破相似律的一些问题. 爆炸与冲击, 5, 4 (1985): 1—9
- 4 Chahai J A. On scaling dimensions of craters produced by buried explosives. *J. Geoph. Res.*, 70 (1965): 5075
- 5 Baker W E, Westine P S. *Similarity Methods in Engineering Dynamics*. Hayden Book Company, Inc. Rochelle Park, New Jersey (1973)
- 6 冯叔瑜, 朱忠节, 马来耀. 爆破工程 (上). 人民铁道出版社 (1980)
- 7 Kou Shao-quan (寇绍全), Chu Yao (褚瑶), Gao Hua (高桦), Gao Ke-jia (高克家). Fracture toughness of grey cast iron under high loading rate conditions. Proc. Int. Symp. on Intense Dynamic Loading and Its Effects, Science Press, Beijing (1986): 690—695.
- 8 Klepaczko J. Application of the split Hopkinson pressure bar to fracture dynamics. Inst. Phys. Conf. Ser. No. 47 (1979): 201—214
- 9 Oucterlony F. Fracture mechanics applied to rock blasting. 3rd Int. Cong. of Int. Soc. for Rock Mechanics, Denver, Colorado, Sept. 1974
- 10 Fournery W L. Fragmentation studies with small flaws. Rock Fracture Mechanics. Ed. by Rossmannith H P. CISM, Udine (1983): 321—340
- 11 Fournery W L. Fragmentation studies with large flaws. Rock Fracture Mechanics. Ed. by Rossmannith H P. CISM, Udine (1983): 341—352
- 12 Fournery W L. Fracture control blasting. Rock Fracture Mechanics. Ed. by Rossmannith H P. CISM, Udine (1983): 301—319
- 13 Persson P A, Holmberg R. Rock dynamics. SveDeFo Rep. DS 5 (1983)
- 14 Warpinski N R, et al. High energy gas fracture, Multiple fracturing in a wellbore. Proc. 20th U.S. Symp. on Rock Mech. Austin, USA (1979)
- 15 Fournery W L. Ground vibration studies. Rock Fracture Mechanics. Ed. by Rossmannith H P (1983): 374—381

## NEW DEVELOPMENT IN THE THEORETICAL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF ROCK AND SOIL BLASTING

Kou Shao-quan      Zhang Zong-xian

Feng Ming-han      Xu Chao-shui

(Beijing University of Iron and Steel Technology)

**Abstract** This paper reviews a series of new theoretical and experimental works in rock and soil blasting with emphasis on the urgent engineering problems, such as large burden blasting, obtainment of reasonable fragmentation size, fracture control and the safety in ground vibration.

**Keywords** *blasting, fracture mechanics, fracture control, safety, similarity method*