

# 岩体中爆炸应力波参数的现场试验研究

朱瑞庚 李廷芥

根据现场实验研究结果,推出了空腔比和爆炸应力波参量之间的关系。给出了应力波沿药包轴方向的衰减情况以及地质条件对衰减指数的影响、波阻抗和衰减指数间的依赖关系。

在岩土工程中爆破作业是常采用的手段。药包在岩体中爆炸时所激起的爆炸应力波以很高的速度一瞬间就向岩体四周传播,这种应力波在不同的区段可出现地冲击波、强应力波、应力波和地震波等<sup>[2]</sup>。目前,在现场测量中一般只能获得爆炸应力波的综合效应,我们称为应力波参数,它由峰值、上升时间、作用时间等组成,一般认为应力波峰值是最有代表性的。下面我们将研究应力波峰值与其各影响因素之间的关系。

实验证明,爆炸应力波在岩体中的传播过程是随时间及空间位置而变化的,因而它作用于地下工程的动荷载也是变化的。这种变化又显著地与岩土介质的性状(包括弹性、塑性、各向异性、非均匀性及节理裂隙的存在和方向位置等)有关,也与爆源条件,炸药性质、药包形状、药包在药室中的状态(包括空腔比及装填密度等)和堵塞条件等有关。

目前要从理论计算来严格求解这一类问题暂时还不可能。因为不仅传播波的岩土介质的性状十分复杂,而且激起波动的爆源条件也十分复杂,目前还没有一个力学模型可以把这些因素都包括进去。一些学者<sup>[3,4,5]</sup>曾做过尝试,但由于过分简化而导致结果偏离实际甚远,尚不宜用于工程设计。从多年从事工程问题的现场测试研究中,我们对影响应力波传播的某些因素进行了研究,归纳出定量关系,为工程设计提供经验公式。并试图在此基础上辅以数值计算和实验室模拟试验,推动这类问题的理论解。

本文着重介绍影响应力波参数各种因素的现场试验结果:

## 1. 空腔比与岩体中应力波参量之间的关系

药室体积  $V_R$  与药包体积  $V_b$  之比  $D_V = V_R/V_b$  或  $D_r = R_1/R_0$  称空腔比。(  $R_1$  ——药室的半径或等效半径,  $R_0$  ——药包半径或等效半径)。

实验表明,对同一种炸药在其他重要的条件都相同的情况下,空腔比的大小直接影响腔壁压力,而腔壁压力又直接影响岩体中应力波参数。

在人工开挖的岩石台阶上对空腔比进行了专题试验(图1)。岩石为灰白——褐黄色中粗粒花岗岩,其主要成份为石英、斜长石、黑云母及角闪石。实测该花岗岩体的物理力学特性如下:纵波速度:西部  $c_p = 1800 - 2100\text{m/sec}$ 、东部  $c_p = 1600 - 1900\text{m/sec}$ ,泊桑比  $\nu = 0.27$ ,容重  $\rho = 2.5\text{g/cm}^3$ ,弹性模量:西部  $E_w = (8.0 - 11.0) \times 10^4\text{kg/cm}^2$ 、东部  $E_e = (6.0 - 9.0)$

$\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ , 抗压强度  $\sigma_p = 700 \text{ kg/cm}^2$ 。

在台阶上的垂直钻孔中埋入传感器, 其位置与爆破孔位置在同一高程(见图1)并使传感器处于药包长轴的中心平面上。用力学特性与岩体相当的特制胶泥回填。应力测量采用压电晶体测量系统(图2), 应变测量采用应变原件体探头配动态应变仪(图3)。

1) 条形药包在不同空腔比的情况下爆炸时岩体中应力波传播的特征。

实验数据的归纳, 本文试用指数函数表示, 实测应力波峰值随测点到药包中心的距离

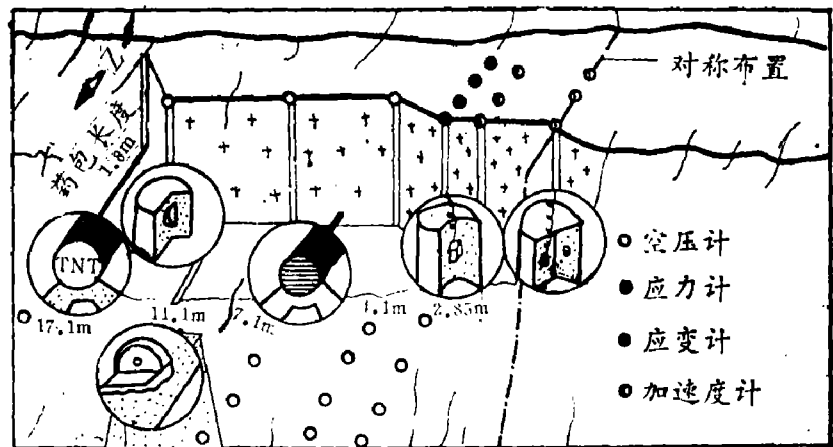


图1 a 空腔比试验布置示意图

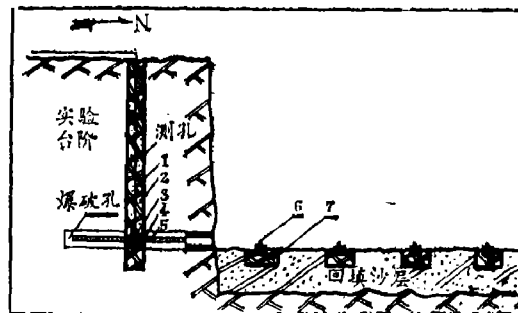


图1 b 实验台阶示意图

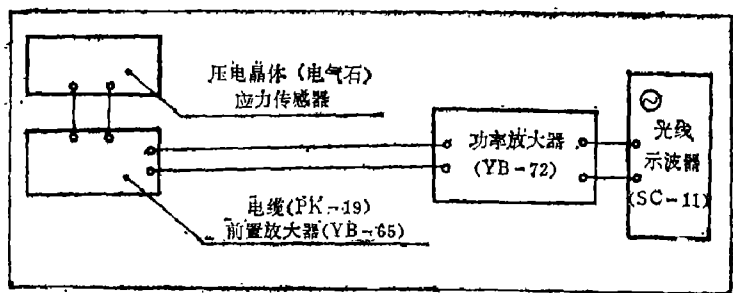


图2 应力测量系统框图

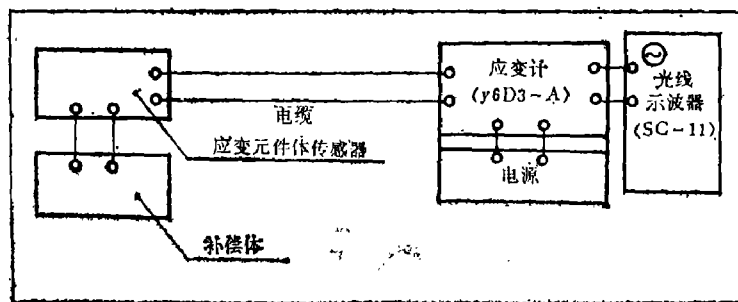


图3 应变测量系统框图

(R)而衰减的定量关系, 即将应力波峰值与距离的关系写成:

$$\Phi = K(\bar{r})^{-n} \quad (1)$$

式中:

$K$  - 为实验确定的系数,

$\bar{r}$  - 比例距离  $\bar{r} = \frac{R}{R_0}$  ( $R_0$  - 药包半径)

$n$  - 与介质有关的衰减指数;

按(1)式整理垂直于条形药包轴的平面上各测点的径向(y向)分量的数据, 发现应力 $\sigma_y$ 、应变 $\epsilon_y$ 和加速度 $A_y$ 与比例距离 $\bar{r}$ 的关系曲线在双对数坐标系中基本呈平行排列, 即随着空腔比的增大而减少(图4)。这说明药包爆轰后, 在空腔中形成的复杂的空气冲击波对空腔壁的作用随空腔增大而衰减, 由此也导致了岩体中应力波参数降低<sup>[1]</sup>。

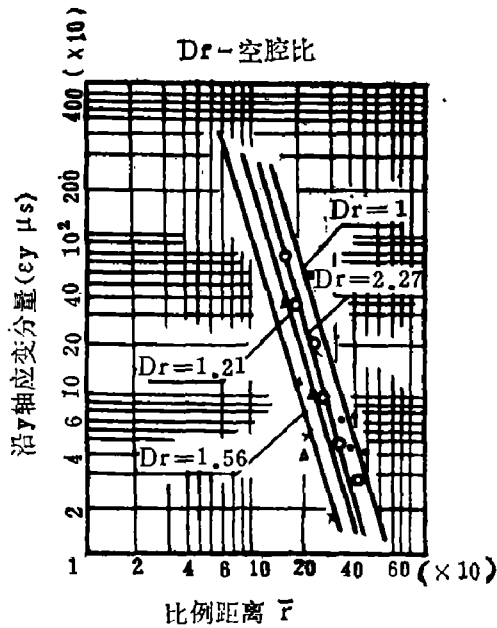


图4 b. 不同空腔比开口爆炸时应变分量 $\epsilon_y$ 与比例距离 $\bar{r}$ 关系。

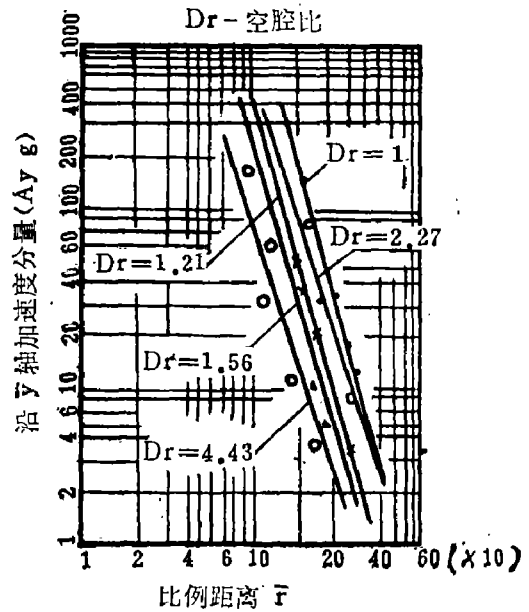


图4 a. 不同空腔比开口爆炸时加速度分量 $A_y$ 与比例距离关系。

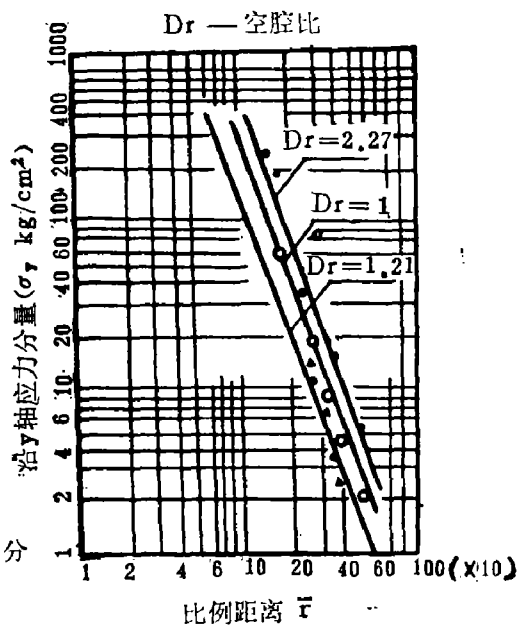


图4 c. 不同空腔比开口爆炸时, 应力分量 $\sigma_y$ 与比例距离 $\bar{r}$ 关系。

由图4可见, 这些  $(\sigma_y - \bar{r}, \varepsilon_y - \bar{r}, A_y - \bar{r})$  曲线的斜率基本一致, 形成了一组近乎平行的直线。对条形药包爆炸来说, 除了解垂直药包长轴方向的应力波径向分量分布特征以外, 还必须了解沿药包轴另两个方向分量  $\varepsilon_x, \varepsilon_y$  的分布特征。经整理实测数据后发现  $\varepsilon_x - \bar{r}, \varepsilon_y - \bar{r}$  关系也有类似于上述规律, 即出现一组近乎平行的直线。比较  $x, y, z$  三个方向的应变分量, 有下列关系:  $\varepsilon_y > \varepsilon_x; \varepsilon_z$ , 即径向分量最大、切向、垂直分量次之。

2) 空腔比与应力波参量之间的相关关系:

根据上述试验资料, 在其它条件相同的情况下, 应力波参量随空腔比D的变化可用下列关系式表达:

$$\left. \begin{matrix} \sigma \\ \varepsilon \end{matrix} \right\} = aD^{-b} \quad (2)$$

表1给出了实测结果整理而得的系数 a、b 及表征误差的相关系数  $\zeta$  值。

表 1

参 数 名 称	a	b	$\zeta$
应 力 $\sigma_y$	37	1.60	0.997
应 变 $\varepsilon_y$	172	1.31	0.984

2. 开口爆炸对岩体应力波参量的影响

条形药包一端开口爆炸时空腔中的空气冲击波可轻易从开口端冲出 (图 6 a), 一部分能量从口部向外部空气中传出去, 另一部份能量向岩体中传递, 而这种传递不仅引起垂直药包轴线方向是变化的, 在沿药包轴线方向也是变化的。

1) 应力波沿药包轴方向的分布

实验结果表明: 径向应变出现最大值的位置不在药包轴的中心线, 而向药包底部偏离。在一定的范围内, 最大应变值约距药包底部  $\frac{1}{3}l$  ( $l$ —药包长度) 处 (图 6 b)。这说明, 发生这类爆炸时在岩体中产生的应力波并不是柱面波。图 6 b 还表明, 随着离爆心的距离增大, 应力波参量在沿药包轴线方向的变化也减小。

2) 自由场中一点应变主轴的确定

我们称不受边界条件影响的无限体为自由场。条形药包一端开口爆炸在岩体自由场中产生复杂的三维应力场。我们在实验中安排了实测并观察了岩体中各点最大主应力分量及其应力主轴变化趋势。现根据实测结果, 对上述问题做一初步探讨。

在一次若干吨药量的爆炸实验中, 对距药包轴线  $r = 15.80$  处测得的三向应变值进行数学处理可确定该点应变状态:

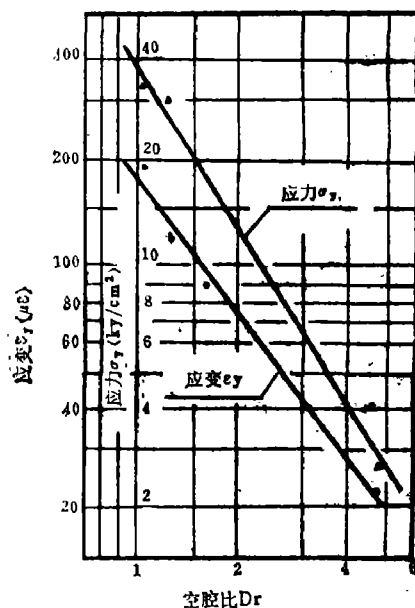


图5 应力  $\sigma_y$ , 应变  $\varepsilon_y$  与空腔比  $D_r$  关系曲线

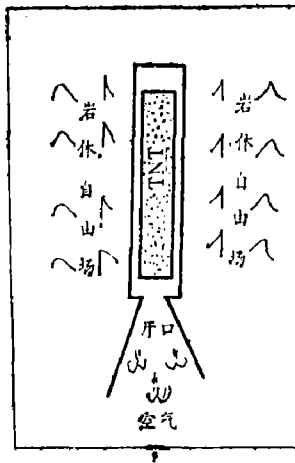


图6 a 条形药包一端开口爆炸示意图

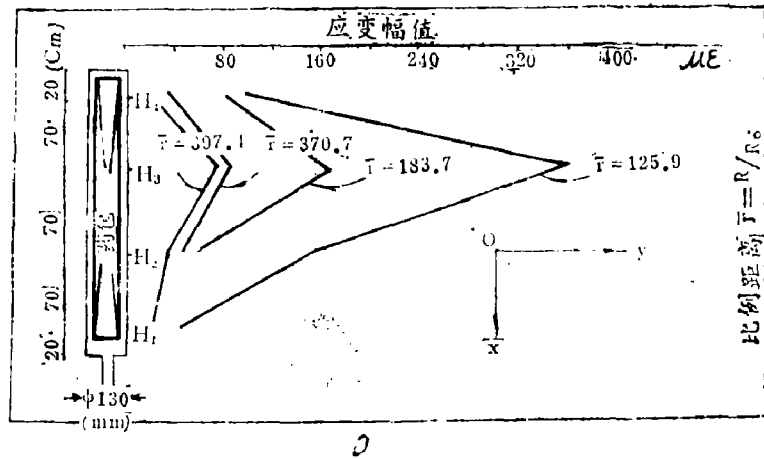


图6 b 不同比例距离沿药包轴向应变幅值变化曲线

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yx} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 143 \\ 242 \\ 82.5 \\ -165 \\ 24.0 \\ 54.0 \end{Bmatrix} (\mu\epsilon) \quad (3)$$

将(3)式结果代入下列三次方程,并求解:

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon}^3 - (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z)\bar{\epsilon}^2 + \left[ \epsilon_x\epsilon_y + \epsilon_y\epsilon_x + \epsilon_x\epsilon_z - \frac{1}{4}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yx}^2 + \gamma_{zx}^2) \right] \bar{\epsilon} \\ - \left[ \epsilon_x\epsilon_y\epsilon_z + \frac{1}{4}\gamma_{xy}\gamma_{yx}\gamma_{zx} - \frac{1}{4}(\epsilon_x\gamma_{yx}^2 + \epsilon_y\gamma_{zx}^2 + \epsilon_z\gamma_{xy}^2) \right] = 0 \end{aligned}$$

可得主应变分量值,

$$\begin{Bmatrix} \epsilon_1 = 288 \\ \epsilon_2 = 61.7 \\ \epsilon_3 = 118 \end{Bmatrix} (\mu\epsilon) \quad (4)$$

将(4)结果代入正应变的极值方程组:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial(\epsilon_x - \epsilon)}{\partial l} &= 2(\epsilon_x - \epsilon)l + \gamma_{yz}m + \gamma_{zx}n = 0 \\ \frac{\partial(\epsilon_y - \epsilon)}{\partial m} &= \gamma_{xy}l + 2(\epsilon_y - \epsilon)m + \gamma_{zx}n = 0 \\ \frac{\partial(\epsilon_z - \epsilon)}{\partial n} &= \gamma_{xy}l + \gamma_{yz}m + 2(\epsilon_z - \epsilon)n = 0 \end{aligned} \right\} (5)$$

式中  $l, m, n$  为主应变方向余弦值, 方程组(5)中任意二式与方程  $l^2 + m^2 + n^2 = 1$  联立

求解可得三个主应变值相应的方向余弦值。

$$\begin{cases} l_1 = 0.446 \\ m_1 = -0.862 \\ n_1 = -0.241 \end{cases} \begin{cases} l_2 = 0.573 \\ m_2 = 0.313 \\ n_2 = -0.758 \end{cases} \begin{cases} l_3 = 0.690 \\ m_3 = 0.403 \\ n_3 = 0.600 \end{cases} \quad (6)$$

并绘出主应变  $\epsilon_1$ 、 $\epsilon_2$ 、 $\epsilon_3$  在空间与坐标系  $O_{xyz}$  各轴的夹角。

$$\begin{cases} \alpha_{\epsilon_1 \cdot x} = 65^\circ 59' \\ \beta_{\epsilon_1 \cdot y} = 136^\circ 46' \\ \gamma_{\epsilon_1 \cdot z} = 103^\circ 33' \end{cases} \begin{cases} \alpha_{\epsilon_2 \cdot x} = 55^\circ 4' \\ \beta_{\epsilon_2 \cdot y} = 71^\circ 45' \\ \gamma_{\epsilon_2 \cdot z} = 139^\circ 10' \end{cases} \begin{cases} \alpha_{\epsilon_3 \cdot x} = 46^\circ 8' \\ \beta_{\epsilon_3 \cdot y} = 66^\circ 4' \\ \gamma_{\epsilon_3 \cdot z} = 53^\circ 7' \end{cases} \quad (7)$$

由结果 (6)、(7) 可绘出所测点以主应变  $\epsilon_1$ (OB)、 $\epsilon_2$ (OA)、 $\epsilon_3$ (OC) 为主轴的二次曲面——应变椭球 (图 7)。令主应变  $\epsilon_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 的方位角为  $D_i$ ，倾角为  $V_i$ ，并规定角  $D_i$  自  $Ox$  轴起始，反时针方向为正，角  $V_i$  以仰角为正。

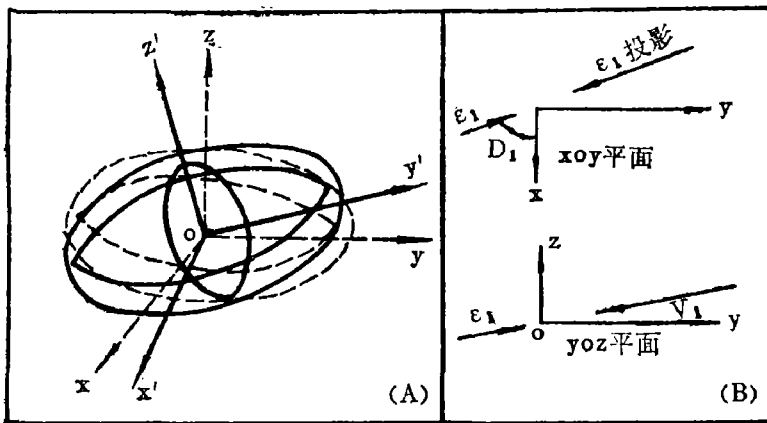


图 7 (A) 应变椭球 (B) 最大主应变投影

对实测点所得最大主应变  $\epsilon_1$  来说，可求得： $D_1 = -62^\circ 42'$ 、 $V_1 = -13^\circ 50'$  与宏观现象调查结果相一致。

进一步的工作可证明：条形药包一端开口爆炸时，距药包轴线的一定远处，最大主应变方向将与  $y$  轴方向趋向一致，即  $D_1 \rightarrow \frac{\pi}{2}$ ， $V_1 \rightarrow 0$ 。

### 3. 地质条件对应力波衰减指数的影响

考虑到岩体是一个被节理裂隙切割的非连续的复合体，不同结构的岩体其性状可有很大差异，物理力学参数也不相同，它们对应力波衰减指数的影响必然会引起差异。我们在现场试验研究基础上，对特定空腔比条形药包一端开口爆炸时地质因素对花岗岩体中应力波传播的影响作了某些研究。

地质条件有差异的 A、B、C、D 四组实测试验在同一花岗岩地区进行。总的来说实验地区的岩体为灰白色或褐黄色中粗粒花岗岩，呈似斑状结构，块状构造。节理较发育，有小断层，大部处于弱风化带，部分结构面为强风化。实测所得的有关力学特性参数为：容重  $\rho = 2.45 \sim 2.61 \text{ g/cm}^3$ ，纵波速度  $c_p = 1700 \sim 4000 \text{ m/sec}$ ，泊桑比  $\nu = 0.29 \sim 0.32$ ，弹性模量  $E = (7.5 \sim 32) \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ ，波阻抗  $\rho c_p = (4 \sim 11) \times 10^6 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{cm/sec}$ 。

各组试验的地质条件简介如下：A 组岩体呈强风化、有四组主要结构面，局部破碎。B 组岩体呈弱风化、节理裂隙发育，未出现破碎带。C 组岩体呈强风、化有几组小断层，特别是  $320^\circ \text{NE} \angle 70^\circ$ ，充有 0.5cm 褐色糜棱岩，破碎带总宽度为 25cm。D 组岩体呈整体块状结

构,较新鲜、致密,波速较高。由此可见四组试验虽同处于花岗岩地区,但各组具体地质条件又有一定差异,因而必然会引起应力波衰减指数出现一定差异。

由公式(1)可知与岩体性状密切相关的应力波衰减指数  $n$  可由下式确定:

$$n = \frac{\lg \Phi_0 - \lg \Phi_1}{\lg r_1 - \lg r_0} \quad (8)$$

对现场进行的四组试验的实测数据加以处理,绘出的衰减指数与各自对应的岩体波阻抗列于表2。

表2

试验代号	衰减指数 $n$		岩石容重 $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	岩体纵波速度 $c_p$ (m/sec)	岩体波阻抗 $\rho c_p$ (g/cm <sup>3</sup> cm/sec)
	应力( $\sigma$ )	应变( $\epsilon$ )			
A	2.76	2.69	2.50	1733	$4.33 \times 10^5$
B	2.68	2.61	2.45	2333	$5.72 \times 10^5$
C	2.71	2.65	2.50	1870	$4.69 \times 10^5$
D	2.51	/	2.61	3830	$10.01 \times 10^5$

必须指出,目前从研究岩体波动问题的角度来看,尚无这方面的岩体分类法。根据现场实践,我们认为用岩体波阻抗来表征岩体的性状对研究波动问题是可行的办法<sup>[2]</sup>。由此,对表2数据进行处理可给出应力、应变参量衰减指数  $n$  与波阻抗  $\rho c_p$  之间的关系式:

$$\left. \begin{aligned} n_\sigma &= -4.11 \times 10^{-7} \rho c_p + 2.92 \\ n_\epsilon &= -5.36 \times 10^{-7} \rho c_p + 2.91 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中:  $\rho c_p$  - 波阻抗  $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \cdot \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$  由现场实测而得。  $n_\sigma$  - 由 A、B、C、D 四组试验数据而得, 相关系数  $r = -0.991$ , 适用于  $4 \times 10^5 \leq \rho c_p < 11 \times 10^5$ ;  $n_\epsilon$  - 由 A、B、C 三组试验数据而得, 相关系数  $r = -0.963$ , 适用于  $4 \times 10^5 \leq \rho c_p \leq 6 \times 10^5$ 。  $n - \rho c_p$  关系曲线见图8。

在实际工程中,对波阻抗范围类似于公式(9)的别类岩体,在确定其自由场应力波衰减指数时可参照公式(9)应用。对于岩体波阻抗大于或小于公式(9)所示范围的别类岩体,可根据公式(9)或图8的曲线,选取合理的应力波衰减指数范围。

#### 4. 结 论

通过现场试验研究可得出下列结论:

1) 应力波参数  $\sigma_{m,x}$ 、 $\epsilon_{m,x}$  随空腔比  $D$  增大而减小,空腔比为岩体中应力波参数的一个重要自变量;

2) 有空腔的条形药包一端开口,爆炸时,应力波沿药包轴的分布是非对称的,径向应变出现最大值的位置不是在垂直于药包的中心线上,而是向药包底部偏离。

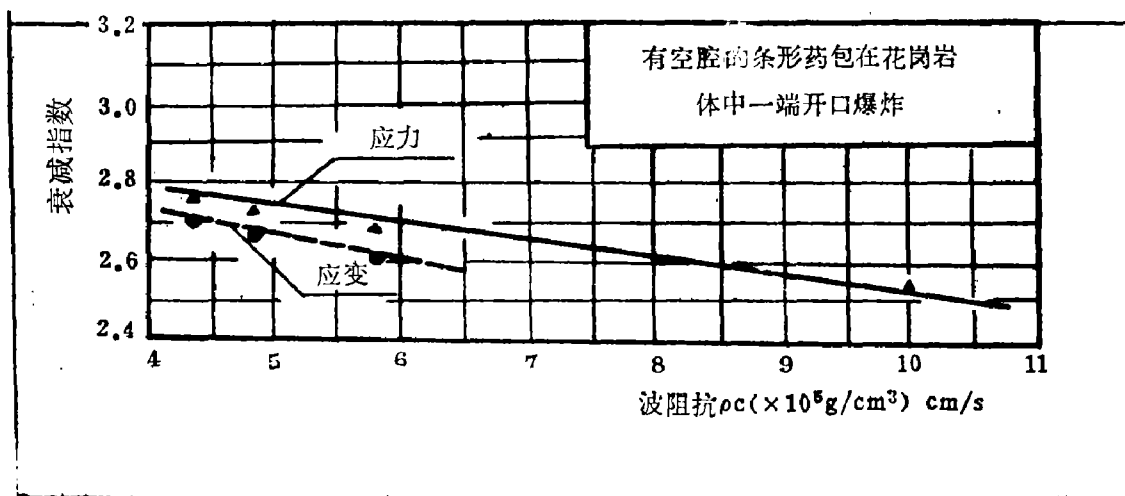


图8 衰减指数与波阻抗关系曲线

3) 对有空腔的条形药包一端开口爆炸条件下测得的一点的三向应变分量进行分析表明, 其最大主应变方向与垂直于药包轴的方向不一致, 而呈一个角度;

4) 试验建立的波阻抗  $\rho C_p$  与应力波参量衰减指数  $n$  之间的关系式, 为不同岩体有空腔的条形药包一端开口爆炸时应力波衰减指数的确定提供了实用的经验规律。

黄承贤、仲跻云等同志参加了现场试验的组织与实测工作, 谨此致谢。

### 参 考 文 献

1. 朱瑞庚 李廷芥 条形药包一端开口爆炸时花岗岩体中应力波传播的试验研究 中国科学院岩体土力学研究所 1979
2. 朱瑞庚 土岩爆破及其力学效应 《岩土力学》 № 2 1979
3. U. S. Corps of Engineers Dept. of the Army, EM 1110-345-434 July. 31, 1961
4. Шемлякин Е. И., В КН. Труды ВНИМИ №. 59 л. изд. 1965
5. Долгов К. А., «ГОРНЫЕ ЖУРНАЛ» Из-сти Вузов № 11 1975



---

## IN SITU EXPERIMENTAL STUDY OF BLAST STRESS WAVE PARAMETERS IN ROCK MASS

Zhu Rui-geng    Li Ting-jie

On the basis of in situ experimental investigation, the relationship between cavity ratio and blast stress wave parameters is established. The attenuation of stress wave along the axis of the strip charge is indicated. The effect of geological conditions on the attenuating index and the interrelation between the wave impedance and the attenuating index are given.