

# 水泥模型中裂缝速度测量

金星男

(1982年12月11日收到)

本文叙述了在水泥模型中测量炸药爆炸时产生的裂缝及其发展速度。

试验表明:裂缝是从中心向外和从外向里两个方向发展并在某处相会贯通;裂缝的速度是随距离的增加而衰减;裂缝速度值的大小是受介质中应力场的分布影响的;裂缝速度的衰减规律,主要是与介质的力学性质有关。

文中也报导了一些新的实验技术和一些新的现象。

无论在大型爆破工程中或是小型爆破试验中,都采用炸药的爆炸作用来使周围介质产生破坏,产生裂缝,达到爆破的目的,这是众所周知的事情。但炸药的爆炸作用如何使周围介质产生破坏,产生裂缝?即裂缝是什么时候产生,以什么样的速度向前发展,发展到什么地方等等。这是大量爆破工程和控制爆破中,控制破坏范围的关键性问题,也是从理论上研究爆破机理中的重要问题。对这个问题国内外很多学者都在研究,特别是围绕光面爆破与予裂爆破的机理,研究得比较多。例如利用高速摄影机观测有机玻璃模型中的裂缝发展,裂缝数目等等。但在脆性材料如岩石、混凝土中裂缝的产生和发展速度观测得还不多。这是因为用一般的光学仪器和电子仪器直接测量非透明、非导电性介质中的裂缝及其发展还有些困难。另外诸如岩石等非透明、非导电性的物质是一种抗拉强度比较低的脆性材料,如果采用导电性强的金属物质(如电阻丝、铝薄片)做传感器,那么它们的力学性质不匹配,得不到满意的结果。这有可能出现裂缝的信息迟后于裂缝实际发生和发展的时间,甚至于用肉眼分辨不清的微小裂缝,由于金属丝不能断开而得不到信号。因此,必须找到导电性好并具有脆性材料力学性能的物质做传感器。经过摸索试验,证明铅笔芯作为这种传感器的材料是比较理想的。因为它的导电性能好(电阻值 $150\Omega/\text{米左右}$ ),抗拉强度比较低(约 $8\sim 10\text{kgf}/\text{cm}^2$ ),用502胶容易粘结于水泥块内部或表面上。

本文就是利用铅笔芯作为传感器,在水泥模型中进行爆破来观测裂缝速度并连同其结果作一介绍,并为进一步研究爆破破坏机理提供参考。

## 一、试验原理与试验装置

### 1. 基本原理

试验工作是把铅笔芯用502胶水,沿着径向方向每隔一定距离 $\Delta l$ ,以圆圈式或弧形式,贴

在水泥模型内部或表面上。当炸药爆炸后伴随水泥块出现裂缝的铅笔芯断线信号，通过微分线路输入到示波器(或A/D变换器)，直接读出每两个点之间间隔时间 $\Delta t$ 。每两个点之间裂缝发展平均速度即 $\bar{V} = \Delta l / \Delta t$ 。

### 2. 铅笔芯装置

因为炸药爆炸作用是向四周辐射出去，裂缝及其方向是有几率性的。为了消除几率的影响，铅笔芯作成园圈式(见图1a)。同时，为了保证一个径向方向的裂缝断裂时间的先后，铅芯又作成园弧形(见图1b)。其端部用铜线引出来作联线之用。



(a) 园圈式铅笔芯装置

(b) 园弧形铅笔芯装置

图1 铅笔芯装置

### 3. 电测装置

电测是按图2所示方框的装置进行的。因为传感器是多点测量，并具有不同电阻，因此必须经微分线路，把断线信号输入到示波器中记录。

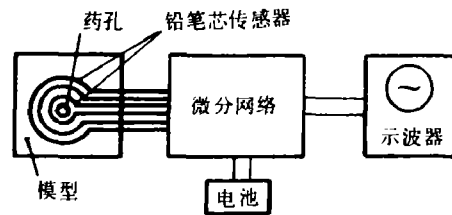


图2 测试装置方框图

### 4. 水泥模型及炸药

水泥模型采用矿渣硅酸盐水泥325号，配合比为水泥：砂：水=1：3：0.7。养护一个月，模型尺寸为 $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ 。

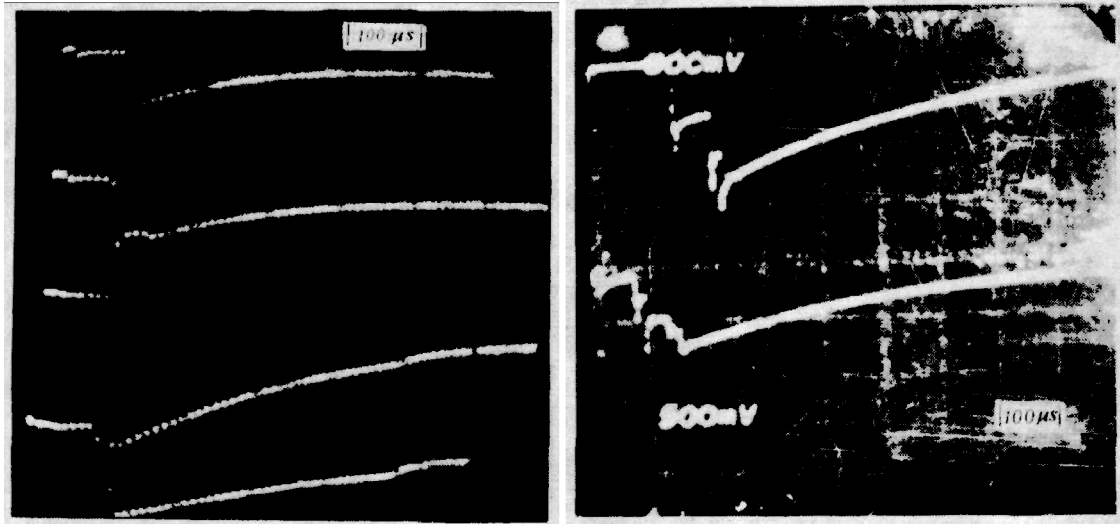
试验用炸药为模压太安球形炸药，直径为 $1.0 \text{ cm}$ ，重量为 $0.92 \text{ g}$ ，密度为 $1.68 \text{ g/cm}^3$ 。药孔深 $W = 15 \text{ cm}$ ，堵塞材料为红钢笔水或粘土。

## 二、试验结果

试验是在药孔直径 $d = 1.0, 1.5 \text{ cm}$ 条件下用红水或粘土堵塞进行的。每个模型测6个点，共进行15个模型。分别测得模型内部和表面的裂缝发展速度。测得数据列于下表，测得波形如图3所示。

裂缝速度测量数据表

模型 编号	测量 位置	药孔直径 $d$ (cm)	堵塞 材料	块度 数目	测量点	间 距 $\Delta l$ (cm)	间隔时间 $\Delta t$ ( $\mu s$ )	裂缝平均速度 $\bar{V}$ (M/s)
1	内部	1.0	水	4	1-3	5	110	455.5
					1-5	10	420	161.1
2	内部	1.0	水	4	0-1	2.5	35	714.2
					0-2	5	88	471
					0-3	7.5	185	252
					0-4	10	340	182
					0-5	12.5	520	139
3	表面	1.0	石膏 + 水	4	1-2	2.5	65	384.6
					1-3	5	175	227.2
					1-4	7.5	425	100
					1-5	10	690	94.3
					1-6	12.5	585	238
4	表面	1.0	土	4	1-2	2.5	60	416.2
					1-3	5	190	192.3
					1-4	7.5	440	100
					1-5	10	660	113.6
					1-6	12.5	530	192.3
5	表面	1.0	水	4	1-2	2.5	67	373.1
					1-3	5	180	221.2
					1-4	7.5	335	161.2
					1-5	10	495	156
					1-6	12.5	355	178
6	内部	1.0	水	4	1-2	2.5	52	480
					1-4	5	215	306
7	表面	1.0	水	4	1-2	2.5	60	416.5
					1-4	7.5	355	169
					1-5	10	485	192.1
8	表面	1.0	水	2	1-2	2.5	63	396.2
					1-3	5	170	221
					1-4	7.5	415	102
					1-5	10	675	96
					1-6	12.5	555	208
9	表面	1.5	水	3	0-1	2.5	40	625
					0-2	5	100	416
					0-3	7.5	190	272
					0-4	10	335	172
					0-5	12.5	485	166



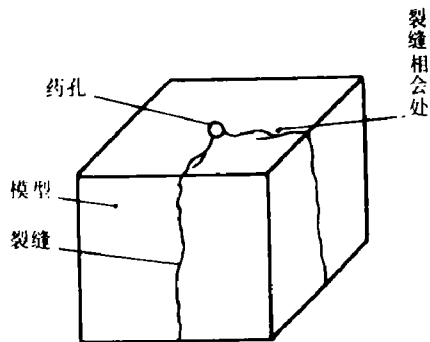
(a) 四线示波记录

(b) 二线示波记录

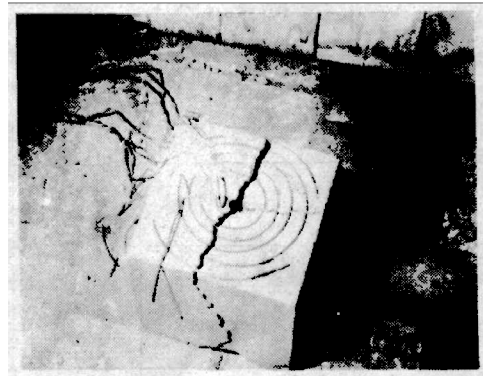
图3 裂缝到达测点时刻示波器记录照片

通过数据整理和爆后现象观测得到下面几点结果(参看图4、5、6、7):

(1) 裂缝主要是发生在径向方向,并先后从药孔向外和从模型边缘向里两个方向发展,这两个裂缝大约在20~25倍药包半径处相会后形成贯通的裂缝,参看图4。



(a) 两个裂缝相会示意图



(b) 裂缝发展照片

图4 裂缝发展

(2) 裂缝发展速度 $\bar{V}$ 随着 $R/r_0$ 的增加逐步降低。

(3) 模型内部裂缝速度比表面速度约大10~15%。

(4) 用水堵塞药孔时的裂缝速度比用粘土堵塞时的速度大10~15%,裂缝相会时间前者比后者也快200 $\mu$ s左右。

(5) 从药孔向外和从边缘向里的裂缝发生时间相差300 $\mu$ s以上。如果应力波在模型中的

传播速度为4000 m/s 计算，那么这个时间相当于应力波在模型中来回的 8 倍左右。

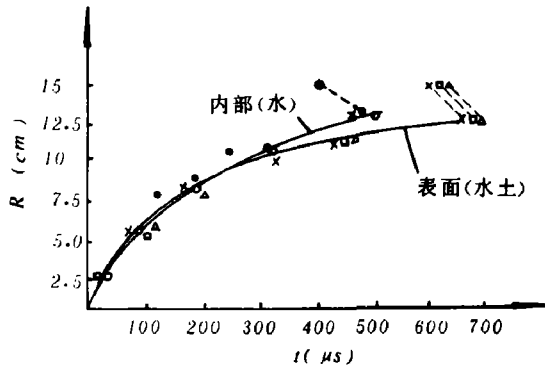


图5 R~t关系曲线

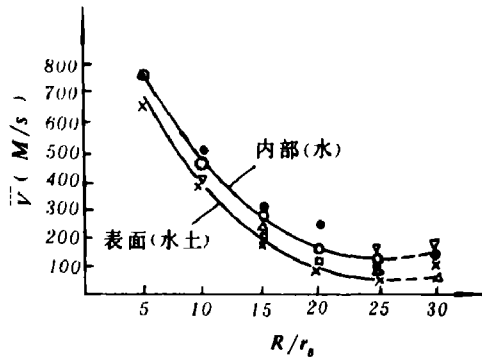


图6 R/r<sub>b</sub>~ $\bar{V}$ 关系曲线

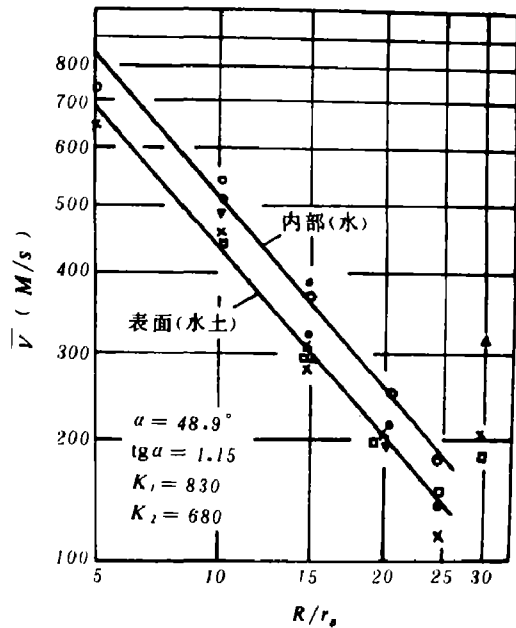


图7 R/r<sub>b</sub>~ $\bar{V}$ 关系曲线

(6)本试验条件下测得的水泥模型中的裂缝发展速度、裂缝相会距离及相会时间的经验公式如下：

内部裂缝发展平均速度（用水堵塞）

$$\bar{V} = K (R/r_b)^a = 830 (R/r_b)^{-1.15} \quad 5 < R/r_b < (20 \sim 25)$$

裂缝相会距离

$$L = (20 \sim 25) r_b \quad R/r_b < 30$$

裂缝相会所需时间

$$T = L/\bar{V} = LK^{-1} (R/r_b)^a \quad R/r_b < 30$$

其中R为距药孔中心任意距离，r<sub>b</sub>为药包半径，K为与炸药、介质有关的系数，a为裂缝速度衰减指数。

(7)经试验证明：贴在水泥块上的铅芯，当水泥模型破裂以后，非常整齐地与裂缝一起断裂；没有断裂处的铅芯，仍然牢固的粘结在上面，没有崩落下去的现象 因此用铅芯测量

非导体脆性材料中的裂缝发展速度的方法是可行的。

### 三、结果分析

从以上的试验结果可以看到,裂缝先是在药孔的孔壁处开始产生并向外发展,迟后一段时间也从自由面开始向里发展,再经一段时间后,两裂缝在某一处相会合。

现在我们把药包看作球形装药进行分析。根据弹性理论分析,无限介质材料中,在半径  $r_0$  大小的球形空壁上有  $p_0$  大小的压力作用时,在孔壁介质内就产生半径方向的应力  $\sigma_r$  及切向方向的应力  $\sigma_\theta$  ( $=\sigma_\phi$ ), 即

$$\sigma_r = -(a/R)^3 p_0$$

$$\sigma_\theta = \sigma_\phi = 0.5(a/R)^3 p_0$$

其中  $R$  为离药孔中心任意点的距离,  $a$  为药孔半径。

因为象水泥块这样的脆性材料,抗拉强度远小于抗压强度。同时,从上式中可以看到,只要  $\sigma_\theta$  值超过介质的抗拉强度  $\sigma_t$ , 即  $\sigma_\theta > \sigma_t$ , 那么在孔壁面上就发生半径方向的裂缝。因为应力波的速度远大于裂缝的发展速度(约 4~5 倍), 所以,应力波先期到达自由面,又从自由面反射。这样应力波在模型中有几个来回,而在自由面上  $\sigma_r = 0$  的条件下,当自由面附近介质中的  $\sigma_\theta$  超过水泥块的抗拉强度  $\sigma_t$  时,裂缝又从自由面开始产生。从测量到的时间上看,自由面上产生裂缝的发生时间迟后于药孔壁上裂缝产生的时间。从应力波传播速度远大于裂缝发展速度以及自由面上没有出现任何飞片及横向裂缝的情况来判断,裂缝的产生和发展是各种波相互作用下的破坏过程。

在无限介质中裂缝的发展速度只与药量的大小有关。随着药量的增加,总的能量在增加,而作用时间增长,因此速度的衰减指数  $a$  就可能会变小,相对于小药量其速度值会增加。但在有限介质中,裂缝的发展速度不仅与药量有关系,而且与自由面的边界条件有关。

从试验结果又看到,由于堵塞材料及条件的改变或测量位置的不同(表面或内部),其速度值有差异。这是因为爆炸载荷作用后,介质中的应力场的分布不一样而造成的。但裂缝发展速度的衰减规律基本上是一致的,这是因为模型的介质性质是相同的。所以,裂缝速度的衰减规律主要是与介质的力学性质有关。

### 四、结 束 语

本文是通过水泥模型中用铅笔芯的方法测量了炸药爆炸作用下裂缝的产生和发展的规律。试验表明:(1)裂缝是从中心向外和从外向里发展然后相会贯通而形成的;(2)裂缝的速度随距离增加而衰减;(3)裂缝速度值的大小和方向受介质应力场的分布影响,即与药量、装药条件、边界条件等因素有关;(4)裂缝速度的衰减规律主要与介质的力学性质有关。

通过本试验条件下得到的一些规律性的东西和出现的现象,对于一些小型爆破设计及控制爆破中,孔间距的确定,钻孔爆破中前后排,时间间隔的确定等可供作参考。

本试验工作中赵双录同志帮助测量, 杜建科同志提供药球, 在此表示感谢。

## MEASUREMENT OF CRACKING VELOCITY IN A CEMENT MODEL

Jin Xingnan

### Abstract

Measurement of extension velocity of cracks, which are produced by an explosion in a cement model, is described in the present paper. Tests show the cracks extend inward and outward simultaneously, coalesce each other at some point. Cracking velocity decreases with increasing distance and dependent upon the stress field in the model and the mechanical properties of the material.

Some new and informative phenomena and experimental techniques are also reported.