

# 条形装药土中爆炸空腔发展过程的实验研究

龙源 林学圣

(工程兵工程学院)

许连坡

(中国科学院力学研究所)

**摘要** 本文通过X光摄影观察无限介质(土)中条形装药爆炸空腔发展的高速现象,得到了实验条件下的空腔发展规律,分析了空腔发展过程中一些重要现象。实验表明:空腔发展符合幂函数规律;空腔运动过程受装药的传爆特征、空腔长径比和裂缝出现时间的影响,空腔最终形状与起爆端位置无关。

**关键词** 条形装药,空腔,X光摄影,土介质。

## 一、前言

近年来,对条形装药的应用研究得到了较大发展,但对其土中爆炸的成腔机理了解甚少。为加深对条形装药土中爆炸的认识,有必要研究爆炸空腔发展规律及形成过程中的一些动态现象、爆炸产物与腔壁介质的相互作用等内容。

爆炸空腔是具有一定装药结构的炸药在疏松或密实介质中爆炸形成的腔体。借助测试手段,观察空腔发展过程,分析其中的重要现象,是研究爆炸产物与腔壁介质相互作用的方法之一。1967年 Колоков 在砂介质中用电磁探针法测得球形装药爆炸空腔发展的初期阶段<sup>[1]</sup>,以后 Альтшулер 又用X光透视法研究了爆炸空腔发展的后期过程<sup>[2]</sup>,这样就得到了砂中爆炸空腔发展的全过程。实验和理论研究都表明,疏松颗粒介质中爆炸空腔的发展规律大致符合 Седов 给出的理想介质条件下的普遍公式<sup>[3]</sup>。

$$\tau = \int_0^{\zeta} \frac{d\zeta}{\sqrt{(1/\zeta^3) - 1}} \quad (1)$$

上式中,  $\tau = [(25\pi)^{1/3} \sqrt{2} \rho_1^{1/6}] / [3^{5/2} \rho_1^{1/2} E_0^{1/3}]$ , 其中  $E_0$  为爆炸能量,  $\rho_1$  为介质密度,  $p_1$  为空腔外部无穷远处压力;  $\zeta = a/a_{max}$ , 其中  $a = a(t)$  为空腔半径,  $a_{max} = \sqrt[3]{(3E_0)/(25\pi\rho_1)}$  为空腔最大半径。

上述实验及理论研究都是在球形装药条件下进行的。对于具有一定长径比的条形装药,研究其在土介质中的爆炸机理及空腔发展过程,是本文的主要内容。

## 二、实验设计

由于爆破介质是不透明的粘土,爆炸空腔的发展是在土介质中发生的高速动态现象,一

般实验手段不能观测, 则采用具有可穿透密实性介质能力的 X 光摄影方法。当爆炸现象发生时, 由于均质模型介质内部出现空腔, 其密度发生较大变化。X 光穿过介质, 在 X 光软片上感光。利用 X 光软片上反差造影的黑度差异和几何形状, 可以分析空腔发展过程和其它有关现象。

图 1 给出实验原理框图。其中 X 射线发生器和起爆装置由数控脉冲式 X 光同步机控制, 起爆与拍摄同步进行。整个测试系统的时间漂移为  $0.2 \mu\text{s}$ 。

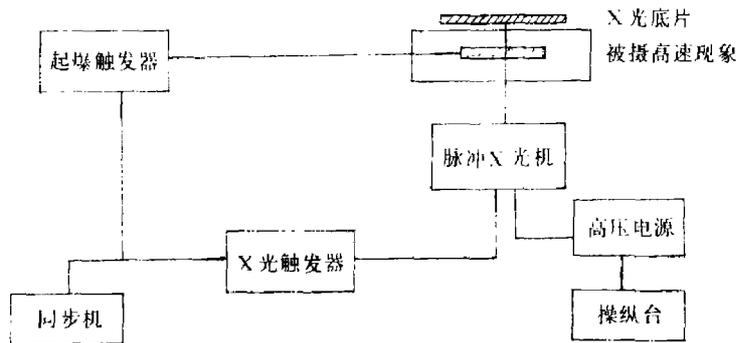


图 1 实验原理框图

试验模型是土介质和装药的接合体。爆破介质选用呈黑黄色的普通地表粘土, 其内聚力  $2.45 \times 10^4 \text{ Pa}$ , 摩擦角  $23^\circ 28'$ 。实验中保持其密度  $1.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ , 含水量  $15 \sim 16\%$ 。装药为粉状纯太安炸药, 装药直径  $5.6 \times 10^{-3} \text{ m}$ , 长径比 21.8, 装药密度  $1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。装药由高压微秒雷管从一端起爆, 其爆速为  $3281 \text{ m/s}$ , 模型制模压力  $1.96 \text{ MPa}$ 。全部实验工作按下列程序框图 (图 2) 进行。

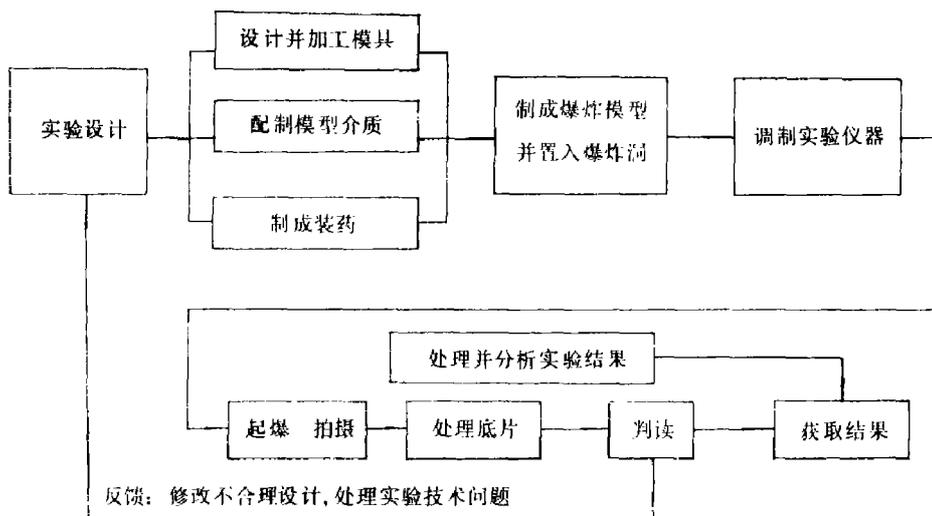


图 2 实验工作程序

### 三、实验主要成果

通过实验得到了装药起爆后不同时刻拍取的X光照片，图3给出了部分不同时刻的空腔照片。实验所得照片记录了装药起爆后1ms内爆炸空腔发展的动态过程。爆炸初期，由于产物膨胀形成了以每秒几百米速度运动的空腔，腔壁后介质被压实，形成压密层。在空腔运动中期，由于空腔径向与轴向运动的差异，使空腔长径比发生较大变化，从而空腔运动也受到

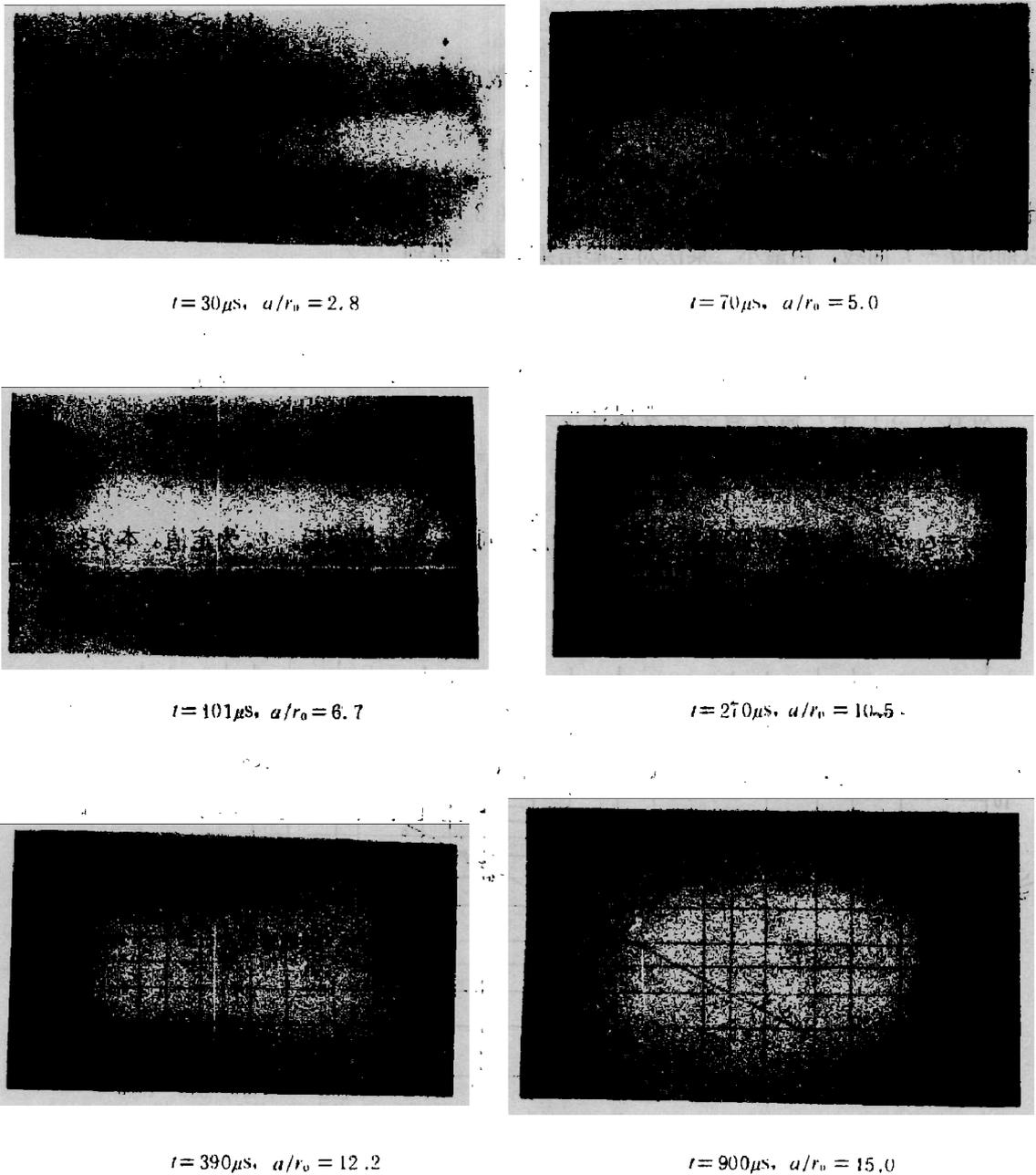


图3 装药起爆后不同时刻的空腔

影响；空腔发展的中后期，腔壁将出现裂缝，而裂缝的出现导致爆炸气体产生渗流，使空腔运动受到影响。最终爆炸空腔给出了空腔运动的终态，空腔半径最大达到  $a_{max} = 25 r_0$  ( $r_0$  为装药半径)。

图4给出了按实验结果得到的空腔中部在对数坐标上的运动曲线。从曲线看出，最初一段 ( $t = 165 \mu\text{s}$  以前) 曲线的斜率为常值，约为0.5。曲线前推至  $t = 2 \mu\text{s}$ ，恰为雷管爆炸作用时间。以后由于空腔形式改变，使空腔运动受到影响，这种影响持续到腔壁上裂缝的出现。裂缝出现后，曲线继续弯曲，其斜率值变化幅度增大，说明裂缝出现对空腔发展有很大影响。

实验表明，空腔发展曲线可用公式表示

$$\frac{a}{r_0} = A \left( \frac{t}{r_0} \right)^\alpha \quad (t > 0) \quad (2)$$

式中， $a$ —空腔半径； $r_0$ —装药半径； $A, \alpha$ —常数或变数； $t$ —时间。上式还可写成

$$\frac{a}{r_0} = \left( \frac{t}{t_*} \right)^\alpha \quad (3)$$

此处  $t_*$  为标志空腔发展起始时刻的时间常数。式(3)可描述空腔发展的全过程。对  $a/r_0 = 9$  以前的  $a \sim t$  曲线，用最小二乘法对实验结果拟合，得到

$$\frac{a}{r_0} = \left( \frac{t}{1.95} \right)^{0.502} \quad (1.95 \mu\text{s} \leq t \leq 165 \mu\text{s}) \quad (4)$$

对于  $t > 165 \mu\text{s}$  的情况，由于  $\alpha$  是变值，故不能用  $\alpha$  和  $t_*$  都确定的式子来表达。

对式(3)中  $t$  微分有空腔发展速度

$$v = \dot{a} = v_* \left( \frac{t}{t_*} \right)^{\alpha-1} \quad (5)$$

式中  $v_* = r_0 \alpha / t_*$  为速度特征函数，其它符号意义同前。当  $\alpha$  确定后， $v_*$  为定值。本实验中， $t = 165 \mu\text{s}$  以前， $v_* = 708 \text{ m/s}$ 。

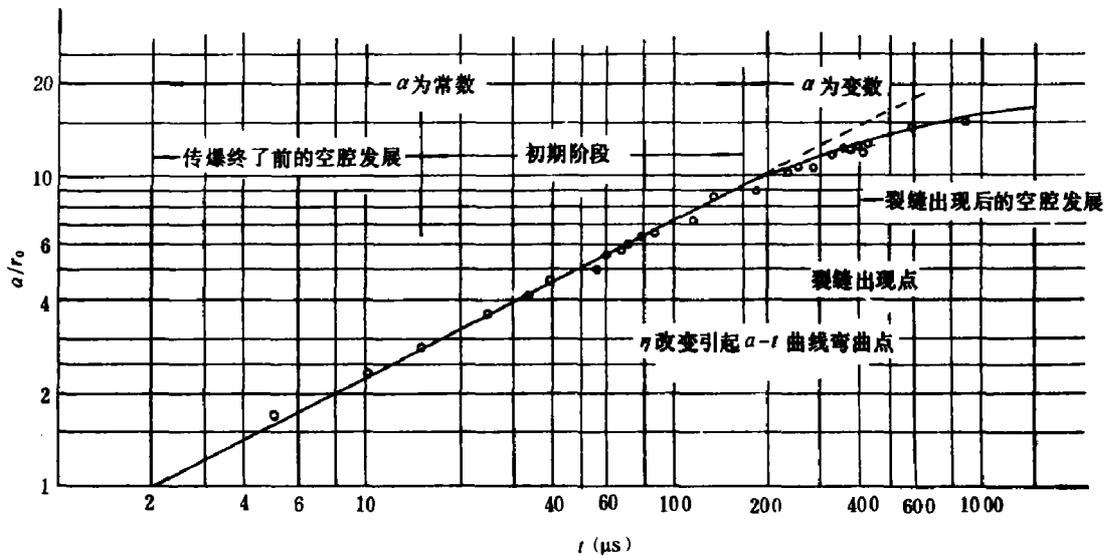


图4 柱腔中部的运动曲线

#### 四、对几个问题的讨论

##### (一) 爆炸空腔在发展过程中维持其柱腔形状的能力。

实验结果得出，装药传爆终了时形成截头圆锥形状的空腔，腔壁斜率  $\text{tg}\beta=0.08$ 。此后，爆炸产物呈准静态向外膨胀，这就是整个空腔形状变化的初始条件，如图5所示。实验表明，

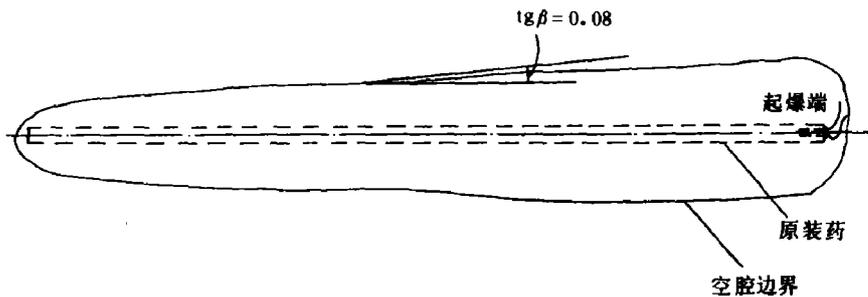


图5 空腔形状变化的初始条件

裂缝出现前，空腔基本保持这个斜率径向发展，任意时刻空腔形状都是初始形状的相似形。图6为沿空腔轴向三个断面处空腔的发展曲线。从图中可见，沿空腔轴向各处空腔壁以相同速度径向发展。其次， $t=420\mu\text{s}$ 以后，三个断面的运动曲线合并成一条，即传爆端方向空腔发展赶上了起爆端方向空腔发展。

裂缝出现前，空腔形状的发展具有“记忆”初始形状条件的能力，此时介质的强度不起作用。

这个重要现象说明，炸药能量在爆炸初期很短时间内就大部分传给了土介质。大致估算<sup>[4]</sup>给出，当  $a=2.5r_0$  时，腔内气体内能占爆炸总能量的11%；传给土介质的动能占总能量的8.2%。土介质获得的最大动能占总能量的8.7%。裂缝出现时，腔内气体内能仅占总能量的5%。

这个现象同时也说明，条形装药土中爆炸的端头效应对柱状空腔发展影响很小<sup>[5]</sup>。

##### (二) 空腔发展过程伴随空腔型式改变的过程。

实验结果表明，发展中空腔的特征尺寸是时间的函数。空腔的直径  $d(t)=2a(t)$ ，轴向长度  $l=l(t)$ ，则空腔长径比  $\eta=l(t)/2a(t)$ 。由实验结果作出的  $\eta-t$  曲线如图7所示。从曲线可以看出：

1. 炸药爆轰终了前， $\eta$  随  $t$  的改变迅速减小。由于  $\eta=l/2a$ ，故只要  $a$  稍有变化， $\eta$  就会变小许多。当传爆结束时，空腔长度与中部直径之比由最初的21.8变为7.5；

2.  $\eta$  与  $l$  和  $d$  随时间变化的速率有关。实验和以往资料<sup>[6]</sup>都已证实， $l(t)$  比  $\dot{a}(t)$  小，故尽管空腔轴向长度在不断增大，但总趋势是使  $\eta$  不断减小；

3. 由  $\eta-t$  曲线和  $a-t$  曲线可看出，当  $t=165\mu\text{s}$ ， $a/r_0=9$  时，裂缝并未出现，但  $a(t)$  曲线开始弯曲。分析认为其原因正是由于  $\eta$  改变至某一特征值的结果，实验中这个值  $\eta=3.1$ 。

空腔从开始运动到终止，其长径比由最初的21.8减小到1.5，这表明，决定空腔特征形状的长径比变化很迅速，且达到某一值时，将使空腔型式发生改变，进而空腔发展规律受到影

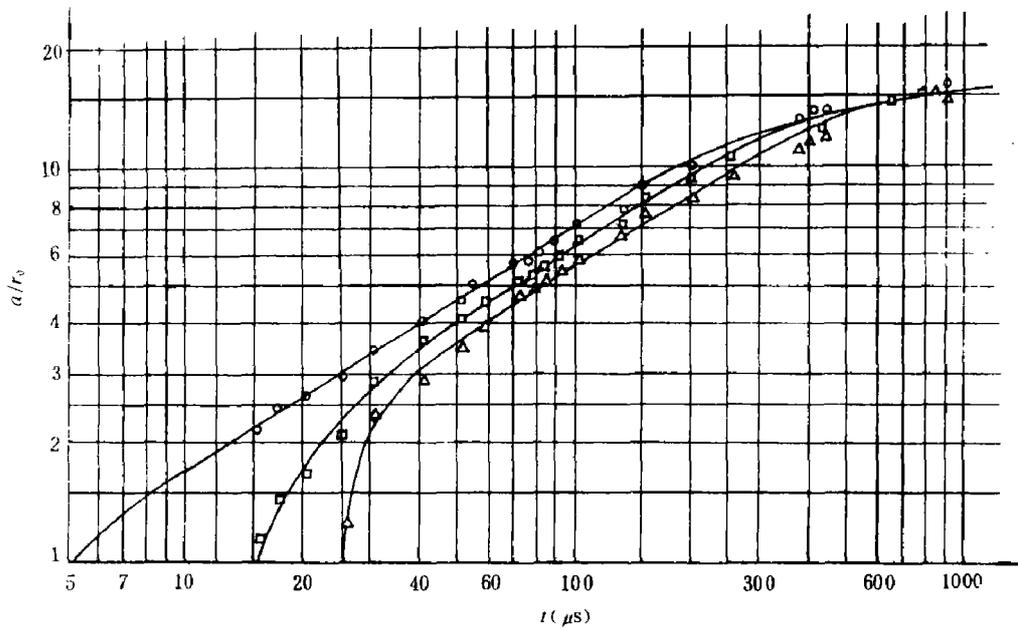


图 6 沿装药轴线三个断面处空腔的发展曲线  
 ○——沿轴线距装药起爆端 20mm 处断面空腔  
 □——沿轴线距装药起爆端 60mm 处断面空腔  
 △——沿轴线距装药起爆端 100mm 处断面空腔

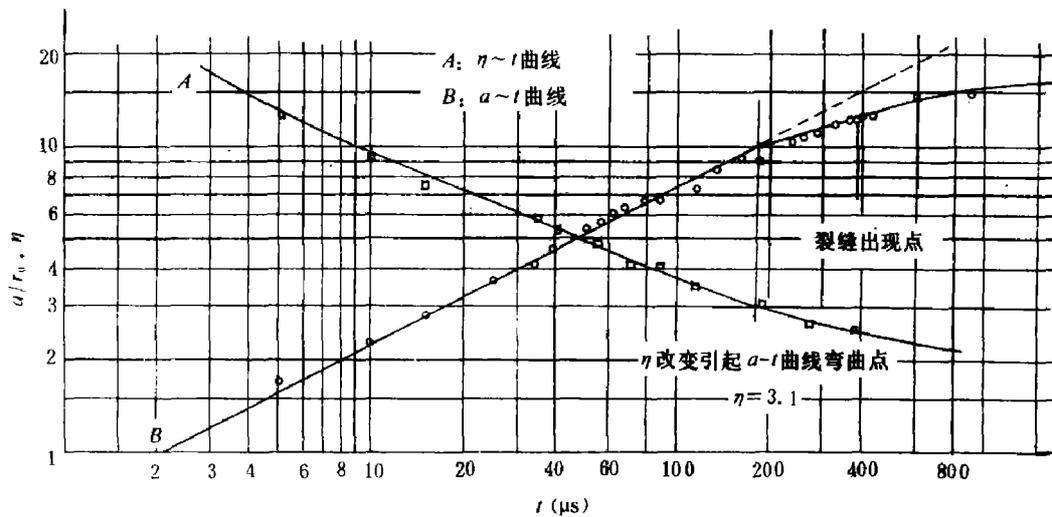


图 7 爆炸空腔的长径比  $\eta$  随时间的变化曲线

响，这是条形装药爆炸空腔发展区别于其它型式空腔的一个显著特点。

(三) 爆炸空腔两端轴向位移基本相同，运动规律一致，空腔轴向发展过程受炸药传爆特征影响，但最终结果与此无关。

图 8 为空腔两个端头轴向发展随时间的变化曲线。曲线给出，在装药传爆过程中，起爆端轴向位移很小， $S_1/r_0 \leq 1$  ( $S_1$  为起爆端轴向位移)，传爆结束后，两端头开始有较大发展，且两者运动规律基本一致。空腔发展终止时，两端的位移均有  $S_{1,2}/r_0 = 14.6$ 。由此可见：

1. 起爆端处的土介质相对于另一端虽然较早受到爆压作用，但在炸药传爆过程中，空腔运动主要是径向，而轴向几乎不产生运动。这说明爆轰波传过后，处于非稳定流态的产物主要是径向膨胀，而轴向膨胀不足以使空腔产生较快运动；

2. 非起爆端处的土介质在炸药爆轰结束后开始运动，虽受到爆轰波强冲击载荷的瞬时直接作用，但并未使空腔在轴向有很大发展；

3. 爆轰结束后，从在爆轰产物作用下的空腔运动中，看到空腔两端轴向运动只有传爆时间上的差别。当非起爆端腔壁裂缝出现后，两端运动曲线趋于一致，即两者运动是对称的。从最终空腔来看，也有类似的结果。

因此，条形装药爆炸空腔两端的轴向运动过程受起爆端影响，但最终结果与此无关。对装药的任意一端，空腔具有相同的轴向位移。从实验结果得知，空腔的轴向位移是径向的 60%。

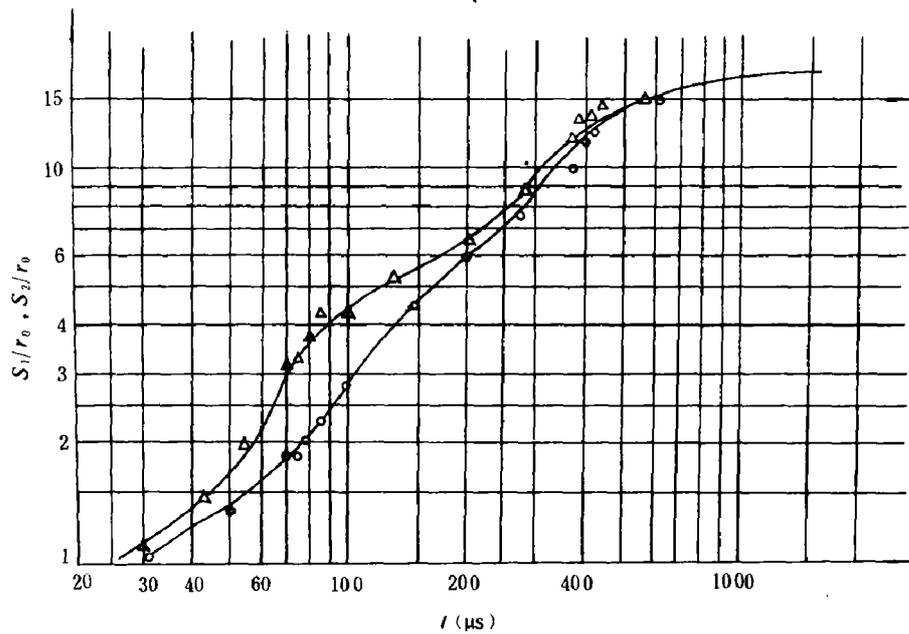


图 8 爆炸空腔起爆端与非起爆端的轴向发展

△——起爆端轴向位移发展曲线  
○——非起爆端轴向位移发展曲线

(四) 与球形装药爆炸空腔的比较

1. 条形装药爆炸空腔的发展速度快。对理想介质，Селов<sup>[7]</sup>有过专门的论述<sup>[7]</sup>。本实验得到柱腔的幂指数  $\alpha = 0.502$ ，这要较相近爆炸条件下球腔的  $\alpha = 0.47$ <sup>[8]</sup> 大。用特征速度  $v_x$  来比较，前者为 708 m/s，后者为 410 m/s。这说明，前者发展速度要高于后者。

2. 腔壁裂缝出现时间晚<sup>[9]</sup>。

3. 对装药一端起爆的空腔发展过程, 还具有裂缝尖端最初是二维发展的特点<sup>[10]</sup>。这个特点恰好使裂缝沿轴向逐步影响空腔的发展。

4. 球形装药爆炸空腔是装药形状的相似形, 而条形装药爆炸空腔由于存在两个端头的轴向效应而不具备上述相似关系。

## 五、初步结论

1. 条形装药爆炸空腔的发展符合幂函数规律:  $a/r_0 = (t/t_0)^\alpha$ 。爆炸初期  $\alpha = 0.502$ ,  $t_0 = 1.95\mu\text{s}$ ; 速度特征值  $v_0 = 708\text{m/s}$ 。

2. 空腔发展过程中, 炸药的传爆特征一直保持到裂缝出现, 而最终的柱形空腔是由于裂缝出现后传爆端空腔运动逐渐赶上而形成的。这表明, 大部分爆炸能量在爆炸初期就传给了上介质。

3. 空腔发展过程是标志空腔型式  $\eta$  发生变化的过程。当空腔长径比  $\eta$  达到某一值时, 空腔的发展受到影响。该实验条件下特征值  $\eta = 3.1$ , 相应有  $t = 165\mu\text{s}$ ,  $a/r_0 = 9.5$ 。

4. 空腔界面两个端头的轴向位移基本相等, 均占径向的60%。条形装药爆炸的端部效应对柱形空腔的形状影响很小, 与装药长度相等的空腔部分基本上呈柱形, 其半径  $a$  可达  $25r_0$ 。

5. 条形装药土中爆炸与球形装药相比, 除人们熟知的特点外, 还具有空腔发展速度高、裂缝出现时间晚等特点。

致谢: 作者对沈贤玑、庄兆玲、叶序双老师的热情指教表示感谢。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] Колоков, О.С. и др., *Ф.Г.В.*, 3 ( 4 ) ( 1967 ).
- [ 2 ] Альшuler, А.В. и др., *Ф. Г. В.*, 6 ( 4 ) ( 1970 ).
- [ 3 ] Седов, Л.И. ( 沈青等译 ), 力学中的相似方法与量纲理论. 科学出版社 北京 ( 1982 ), 264.
- [ 4 ] 龙源, 条形装药土中爆炸空腔发展过程实验研究 ( 硕士论文 ), 工程兵工程学院图书馆 ( 1987 ), 45.
- [ 5 ] 同 [ 4 ], 34.
- [ 6 ] 同 [ 3 ] 235.
- [ 7 ] 同 [ 3 ] .
- [ 8 ] 许连城, 土岩爆破文集 ( 第二辑 ), 冶金出版社 ( 1985 ), 北京, 4.
- [ 9 ] 同 [ 4 ], 56.
- [ 10 ] 同 [ 4 ] .



## EXPERIMENTAL RESEARCH ON GROWTH PROCESS OF THE CAVITY OF A STRIP-SHAPED EXPLOSIVE CHARGE EXPLODING IN SOIL

Long Yuan Lin Xueshen

*(Engineering Institute, Engineering Corps, PLA)*

Xu Lianpo

*(Institute of Mechanics, Academia Sinica)*

**ABSTRACT** In this paper, the high-speed phenomenon of the cavity growth are observed by means of the flash X-ray photograph when a strip-shaped explosive charge explodes inside unbounded medium (soil). The cavity growth curve has been got on this experimental conditions, and some important phenomenon have been analysed. According to the experimental results, the development of the cavity follows the power law. The movement process of the cavity is influenced by the features of detonation propagation of the explosive charge, the ratio of length-to-diameter of the cavity, and the time at which the cracks appear etc.

**KEY WORDS** strip-shaped explosive charge, cavity, X-ray photograph, soil medium.