

土中爆炸空腔的发展过程

许连坡 金辉 章培德

(中国科学院力学研究所)

提要 本文给出了用X光透视法得到的土中爆炸空腔清晰图片,观察到了空腔和裂缝的发展过程,同时还考查了不同介质性质和炸药品种对空腔发展特征的影响。

无限介质中爆炸空腔的实验室研究,不仅对发展爆破理论是有意义的,对地下爆炸也具有参考价值。1967年 Колоков^[1]首先在砂中用电磁探针测得了空腔发展的后期过程。以后,Альтшулер^[2]又用X光透视法研究了砂中爆炸空腔的初始阶段,这样就得到了砂中爆炸空腔发展的全过程,只是他们所用的炸药和砂都不完全相同。Альтшулер^[3]等还研究了在有强度的介质中爆炸空腔的发展特征,在理论模型的计算方面也开展了研究工作^[4,5],但距解决问题还尚远。本文叙述了用X光透视法研究土中爆炸空腔的发展过程,并初步考查了不同介质性质和炸药品种对空腔发展特征的影响。

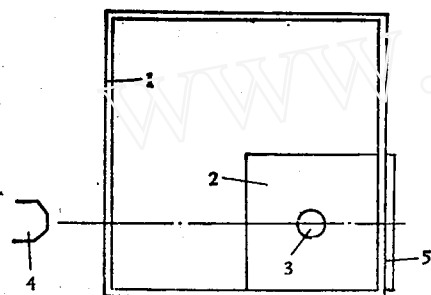


图1 实验装置

1. 实验方法 装置如图1所示,爆炸模型2放在木制爆炸箱1中,实验用一台MX-400型脉冲X光机,机头4的轴线对准爆炸空腔3,得到的图像被记录到底片5上。X光机出光时间长度 $40 \times 10^{-3} \mu s$,同步系统的时间误差小于 $\pm 0.5 \mu s$ 。

模型材料为土和砂,砂为建筑用河砂,土为地表土,经筛选配水后在模具上压制不同尺寸的立方体模型。模型尺寸用应变波走时控制。各类模型的力学参数如表所列

各类模型的力学参数及空腔曲线参数表

介 质 性 质									空 腔 参 数			
名称	材料	制模压力 kg/cm ²	含水量 %	容重 g/cm ³	内聚力 C kg/cm ²	强度 τ_0 kg/cm ²	摩擦角 φ_0	摩擦系数 m	A	B	K m/s	备注
实土	土	2	14—17	1.80—1.85	0.2	0.3	21°36′	0.30	15	6.6	400	
松土	土	1	14—17	1.75—1.80	0.2	0.3	21°3′	0.28	15	7.5	400	
饱和土	土	2	~29	2.20—2.25	0.05	0.1	0°34′	5×10^{-3}			280	
砂	砂	2	~14	1.60—1.65	0.1	0.5	35°	0.45	1	6.1	180	
实砂	砂		3.4	干1.55					20	7.0	360	文献 [1、2] 的资料*
松砂	砂		3.4	干1.55							450	

* 文献[1]的爆源是密度 $\rho = 1.4g/cm^3$ 的泰安,文献[2]的爆源是密度 $\rho = 1.66g/cm^3$ 的焙铸的TF5/5。

本文于1982年1月收到。

爆源有三种：一是直径 1cm 的压装泰安药球，药量为 0.72g，压装密度为 1.58g/cm³；二是直径 1cm 的玻璃壳散装泰安，壳厚小于 1mm，药量为 0.35g，装药密度为 0.8g/cm³；三是 $\Theta\Gamma$ -202 雷管(相当直径 1cm 的球体)，药量 0.7g，压装密度为 1.58g/cm³，等能量泰安当量为 0.47g。药球在压制模型时压入。底片读数误差小于 ± 2 mm。

2. 空腔的发展过程 在上述参数下成功地得到了爆炸空腔的图片。图 4(a)—4(f) 即为压装泰安药球在实土中爆炸时不同时间的空腔图像。从底片上可以看到，在 50 μ s 以前，空腔呈完整的球形，其外层土被压实，可以看到这一土层的边界。当时间超过 50 μ s 以后，空腔半径达到 3—4 个装药半径 r_0 ，这时空腔边界开始出现裂纹，呈颗粒状结构，裂纹密集，宽约 1—2mm，间距约 2—3mm。以后，随着空腔的扩大，部分裂纹加宽加深，形成裂缝，其间距也变大。当时间到 200 μ s、空腔为 5—6 r_0 时，此图像即十分明确。此后，随着空腔的扩大，裂缝继续加宽加深，间距也变大，但其基本图像则变化不大。如到 600 μ s 时，空腔半径已达到 7—8 r_0 ，裂缝宽约 4—6mm，间距增加到 5—10mm，裂缝呈龟裂状，空腔壁变成由许多截头角柱体组成，这时的空腔图像已和爆后开挖所见基本相同了。

空腔半径和时间的关系如图 2 的曲线 1。当时间 $t \rightarrow \infty$ 时，曲线有渐近值，故不能用关系式

$$\frac{a}{r_0} = M \left(\frac{t}{t_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

来表示。这里 a 为空腔半径， r_0 为装药半径， t 为药量， M 、 α 为常数。但下式可以较好地表征整个空腔曲线

$$\frac{a}{r_0} = 1 + \frac{B}{\ln(1+A)} \ln \left[1 + A - A(1+A)^{-\frac{Kt}{ABr_0}} \right] \quad (2)$$

式中 $A = 15$ ， $B = 7.5$ ， $K = 400$ m/s，由于 $t \rightarrow \infty$ 时，(2)式变成

$$a_M = 1 + B$$

这里 a_M 是空腔的最终半径，故 B 值表征空腔的最终半径。又由于 $K = \left(\frac{da}{dt} \right)_0$ ，即 K 是曲

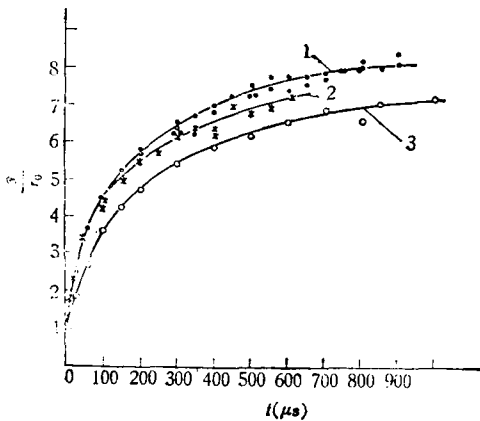


图 2 实土中不同爆源的空腔发展曲线
● 压装泰安药球 * $\Theta\Gamma$ -202 雷管
○ 散装玻璃壳泰安药球

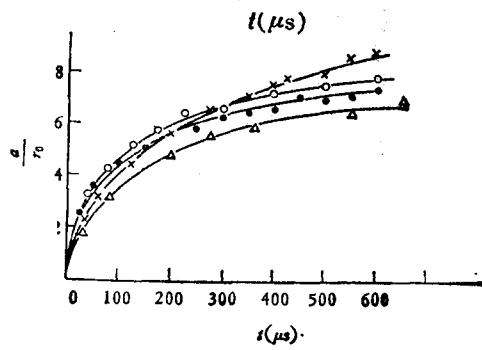


图 3 不同介质的空腔曲线
● 实土 ○ 松土 * 饱和土 Δ 雷管
爆源： $\Theta\Gamma$ -202雷管

线在 $t = 0$ 时的斜率,它具有速度的量纲,在量级上可代表空腔发展的初速度.

图 2 的曲线 1 表明,1 克压装泰安炸药在普通压实土中可炸去半径 $a_M = 8-9r_0$ 的空腔,其完成时间约为 1ms.

3. 介质性质对空腔发展特征的影响 图 3 是 $\Theta\Delta-202$ 雷管在实土、松土、饱和土和砂中爆炸时的空腔发展曲线. 可以看出,在松土和实土中, $100\mu s$ 以前曲线差别不大,且 K 值相同. 后期,松土中空腔要大些. 对饱和土,初期空腔小,但发展较快,故后期空腔比较大. 对砂,无论是初期还是后期,其空腔均比较小.

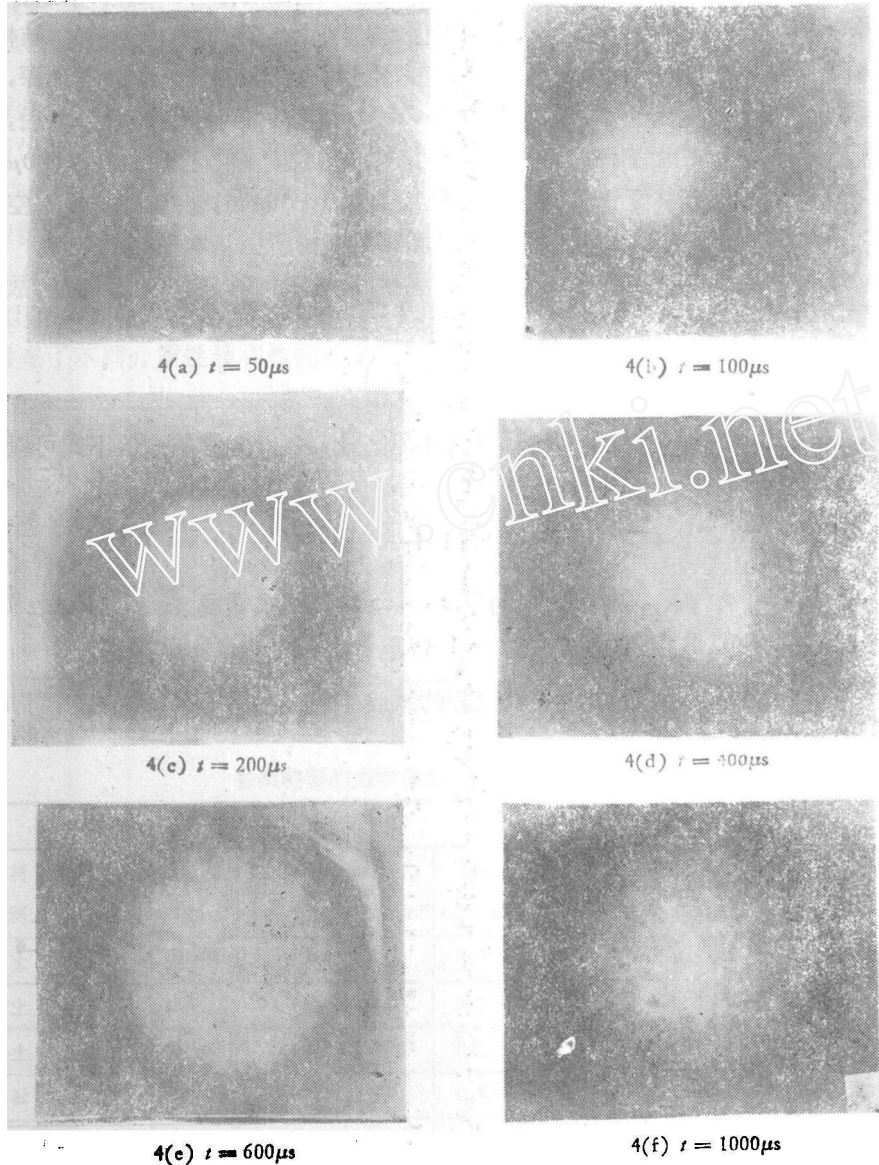


图 4 土中爆炸空腔的发展过程

对实土、松土和砂,其空腔曲线仍可用(2)式表示,有关参数如前表. 而对饱和土,(2)式变成

$$\frac{a}{r_0} = 1 + \lambda \ln \left(1 + \frac{Kt}{\lambda r_0} \right) \quad (3)$$

式中 $\lambda = 3$, $K = 280\text{m/s}$, 其意义仍如前。同样, 文献[1]中松砂的空腔曲线也需用(3)式表示, 其 $\lambda = 1.9$, $K = 450\text{m/s}$ 。

由于空腔发展的初速度主要取决于介质压缩率, 因而介质的相对压缩越大, 则初期空腔也应越大, 但这时压缩层的传播速度也变慢, 故空腔发展的初期特征, 即 K 值和介质的关系是比较复杂的。

对于 B 值, 则随介质的预加压力的增加而降低。如本文砂模型, 预加压力 $= 2\text{kg/cm}^2$, $B = 6.1$ 。文献[1]中实砂, 预压 1kg/cm^2 , $B = 7.0$; 文献[1]中松砂没有预压, B 值很大。土模型, 预压 2kg/cm^2 , $B = 6.6$; 预压 1kg/cm^2 , $B = 7.5$ 。

4. 爆源性质对空腔发展特征的影响 三种爆源的空腔发展曲线如图 2, 用(2)式表示, 曲线 1 和 2 的参数前已给出。对曲线 3, $A = 15$, $B = 6.6$, $K = 240\text{m/s}$ 。因压装药球和 $\Theta\text{D}-202$ 雷管均以压装泰安炸药为主, 装药密度接近, 故爆压接近, K 值接近; 由于散装泰安的装药密度仅为 0.8g/cm^3 , 爆压低, 故 K 值要小些。

对于 B 值, 由于压装泰安药球的药量比 $\Theta\text{D}-202$ 雷管的泰安当量要大, 故其 B 值前者比后者大; 而散装泰安药球和 $\Theta\text{D}-202$ 雷管的药量不同, 但 B 值接近, 这就是所谓炸药和介质的耦合问题, 即效果不只和药量有关, 且和装药的性质有关。

先后参加此项工作的还有杜建科、史小萍、金保堂、黄良佐、边小兵和周燕军等同志。乔敏同志参加了土的力学参数的测量工作。

参 考 文 献

- [1] Колоков, О. С., Тихомиров, А. М., Шалукевец, А. Ф., Развитие котловой полости при взрыве в песчаном грунте, *Ф.Г.В.*, 3, 4 (1967).
- [2] Альтшулер, А. В., Балабанов, А. В. и др., Рентгенографическое исследование начальной стадии Развития камуфлетной полости в песчаной грунте, *Ф.Г.В.*, 6, 4 (1970).
- [3] Альтшулер, А. В. и др., Камуфлетный взрыв в жидких и упруго-пластических среде, *Д.А.Н. СССР Серия математика физика*, 193, 6 (1970).
- [4] Кривцов, В. А., Семенова, Л. А., О приближенном определении развития полости при камуфлетном взрыве сферического заряда в грунте, *Прикладная механика А.Н. УССР*, 3, 9 (1967).
- [5] Котелев, Э. А., О развитии камуфлетной полости при взрыве в мягкой грунте, *П.М.Т.Ф.*, 2 (1975).

DEVELOPMENT OF EXPLOSION CAVITY IN SOIL

Xu Lianpo Jin Hui Zhang Peide
(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

This paper describes an experimental method to observe explosion cavity in soil by radiography and gives a series of flash X-ray radiograms of the process in compacted

soil. The explosive used is a spherical charge of PETN. From these pictures a cavity growth curve can be obtained.

This paper also describes the formation and development of cracks around the cavity and presents cavity growth curves in compacted soil, porous soil, saturated soil and sand.

The main features and controlling factors of each cavity are roughly analysed.

This paper also presents cavity growth curves for three different explosive sources.

www.cnki.net