

条形药包泥面爆炸爆坑发展过程的 X 光摄影研究

任京生 邢维复 周燕军 王小京 黄良佐

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要 用X光摄影技术研究了导爆索在泥面爆炸时爆坑的发展过程, 得到的各瞬时爆坑轮廓线可用椭圆方程描述。瞬时最大爆坑深度约为70~80倍药芯半径, 瞬时最大爆坑宽度约为200倍药芯半径。爆坑深度随时间成对数关系增长, 未见临空面对其有明显影响。临空面对爆坑的影响出现在爆坑宽度为60~80倍药芯半径之后, 爆坑有回缩现象。

关键词 泥面爆炸 X光摄影 爆坑

STUDY ON X-RAY PHOTOGRAPH TECHNOLOGY OF EXPLOSIVE CAVE OF A LENGTH CHARGE BLASTING ON SURFACE OF SLUDGE

Ren Jingsheng Xing Weifu Zhou Yianjun Wang Xiaojing Huang Liangzuo
(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080)

ABSTRACT The process of development of explosive cave which was formed by the blasting of a detonate cord on the surface of the sludge is studied using X-ray photograph technology. As a result of the experiment, the shape of the explosive cave can be expressed by an elliptical equation. The maximal depth and wide of the explosive cave is about 70~80 times and 200 times of the radius of the charge core respectively. The relationship between the depth of the explosive cave and time is logarithmic. The free surface effect on the width of the explosive cave appear after the width extended to 60~80 times of the radius of the charge core. The free surface effect on the depth of the explosive cave is not obvious. The experiment confirmed that there is a contractive process before the development of explosive cave stopped.

KEY WORDS Blasting on the surface of the sludge X-ray photograph Explosive cave

1 前言

爆炸法处理软基在我国是一项新发展起来的工程施工技术, 其中爆炸填石排淤法在多项大型工程中得到了成功的应用, 效果良好。爆炸填石排淤法是瞬态置换法。在爆坑形成的同时, 石舌也随之形成。文献 [1] 通过模型实验研究了石舌形成的机理。本工作则试图将这一问题分

任京生: 爆破力学室副研究员, 硕士。

解,即石舌是通过爆坑形成的。因此在研究爆坑发展过程的基础上,研究石舌和爆坑发展的动态关系。

2 实验布置

炸药在淤泥中爆炸,由于爆炸压力很高,爆坑发展很快因而介质的惯性力很大。与之相比,在爆坑发展的主要阶段,介质的强度、粘性力和重力都是次要的,因此运动是几何相似的,模拟实验中爆坑发展的主要阶段可以成比例放大到现场中。在爆坑发展的后期,由于爆坑发展速度下降,惯性力减小,这时重力和粘性力影响显现出来,问题须另做考虑。

实验中的另一问题是几何尺寸。现场的淤泥在水平方向上是无限的,在实验室中模型尺寸应按什么原则确定才不影响爆坑的运动?实验结果表明^[3],一根导爆索爆后淤泥的变形和流动影响范围只限于爆坑直径40cm 或略大些的范围内,爆坑深度10cm。故实验用钢板箱尺寸为80mm × 40mm × 40mm。

实验装置中淤泥厚度20cm,底层垫10cm 粘土;淤泥为扰动淤泥,含水量60%;X 光源为 Scandiflash X-ray-450型点光源脉冲X 光机,时间精度 $1 \pm 1\mu s$ X 光机头距爆炸装置300cm,对于爆坑来说点光源的X 光可以近似地认为是平行光。模拟条形药包选用标准塑料导爆索,线装药密度为0.012kg/m。为了起爆方便,选定导爆索长度为50cm,其中40cm 为实验爆源,并压入淤泥中,导爆索上缘与泥面平齐;其余10cm 导爆索弯折在空气中作传煤用,并与雷管捆扎在一起,中间夹一漆包线制成的电离电极。当雷管和导爆索爆炸时,电离电极送出电信号,启动X 光机同步机,进行延时和拍摄,同时也作为起爆零时,实验装置如图1所示。

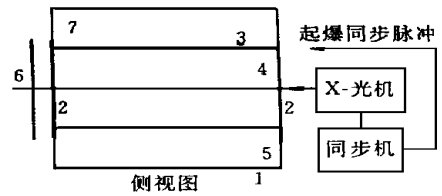


图1 实验装置示意图

Fig. 1 A rrangeent of experimenta apparatus

- 1. 钢板箱 2. 铝板窗口 3. 导爆索 4. 淤泥
- 5. 粘土 6. X 光底片 7. 雷管

3 实验结果及分析

3.1 一般情况

不同时刻爆坑发展的X 光照片示于图2。图中10mm 相当于实体67.4mm, t 从起爆零时算起。

由图2可以看到: 爆坑初期(0.18ms)是封闭的,这一结果可能和装药情况有关。在爆坑发展过程中,爆坑两侧淤泥升起范围较大,但飞溅出的淤泥宽度不大;随着爆坑的发展,飞溅出淤泥的宽度变化不大。这意味着爆坑中挤出的淤泥主要从爆坑两侧升起,其范围大、飞出宽度窄、速度快。

3.2 爆坑形状

爆坑形状轮廓线理论上是二维问题, Y 轴为对称轴,故只画出各时刻轮廓线的一半,如图3所示。这一组曲线可以很好地用椭圆方程近似表达,关系式为:

$$(x^2/a^2) + (y - y_0)^2/b^2 = 1 \tag{1}$$

$$\text{由式 (1) 得: } y = y_0 - b \{1 - (x/a)^2\}^{1/2} \quad (y \geq 0) \tag{2}$$

y_0, a, b 为常数,给出这3个参数曲线就确定了。显然这3个参数是随爆坑的发展而变化的。

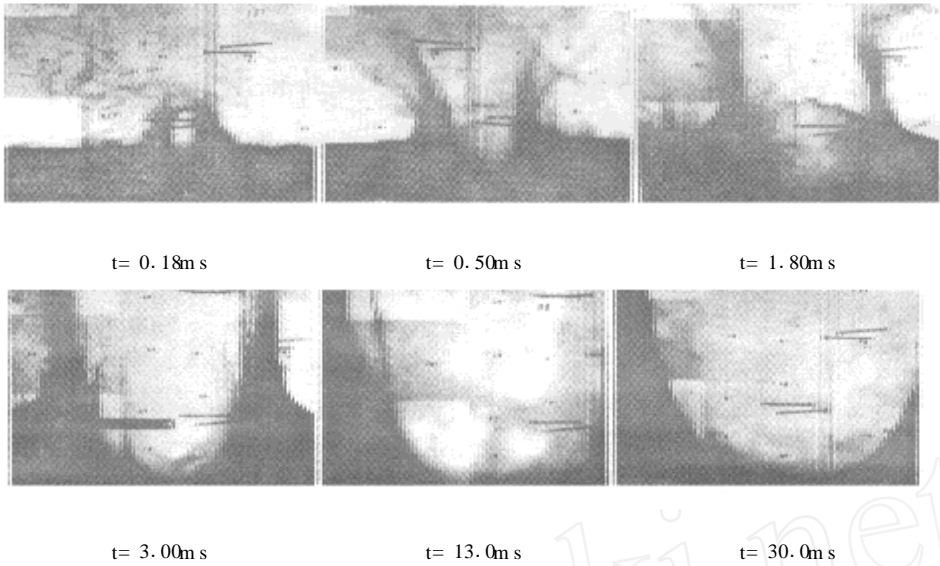


图2 不同时刻爆坑发展的 X 光照片

Fig. 2 X-ray photograph of explosive caves in different times

为了直观, 我们用爆坑深度 h 代替 b , 用爆坑宽度的一半 r 代替 a 。当 $x = 0$ 时, $y = h$, 即:

$$h = y_0 - b \tag{3}$$

我们约定 h 取正值, 于是: $h = |y_0 - b|$

同样, $y = 0$ 时, $x = r$, 则: $(r/a)^2 = 1 - (y_0/b)^2$ (4)

我们把有关数据列于表中, 并列入 a 、 b 值。由表可知, 最大瞬态爆坑深度约为 60~80 倍药芯半径; 最大瞬态爆坑总宽度约为 200 倍药芯半径。这是工程上十分关心的数据。

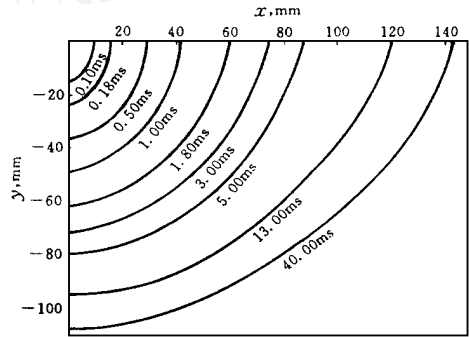


图3 不同时刻的爆坑轮廓线

Fig. 3 Profile of explosive caves in different times

实验结果

Results of experiment

t , ms	0.10	0.18	0.20	0.50	0.70	1.0	1.8	2.0	3.0	5.0	13.0	23.0	40.0	60.0	80.0	静止
h , mm	15	24	26	37	42	49	62	65	73	80	95	98	108	112	105	103
r , mm	10	16		30		41	60		75	88	120		143			
y_0 , mm	0.1	4.0		7.8		14.9	24.6		9.5	16.4	32.3		8.26			
U , m/s	157	87	78.5	31.4	22.4	15.7	8.7	7.9	5.2	3.1	1.2	0.68	0.39		0~0.35	
a , mm	10	16		31		42	63		76	89	124		159			
b , mm	15	28		45		64	87		82	96	127		191			

3.3 爆坑参数随时间的变化

把 h 和 t 的关系画到半对数坐标上, 如图4。可以看到 h 和 t 的关系呈直线, 即是对数关系。计算结果表明, h 、 t 的关系可用下式近似表示:

$$h = h_0 + \lambda_{\infty} \ln\{1 + U_0(t - t_0)/\lambda R_0\} \tag{5}$$

式中: $\lambda = 6.24$, 装药半径 $R_0 = 2.5\text{mm}$; U_b 是爆坑发展初速度, $U_b = \lambda R_0 / t_0 = 236\text{m/s}$; 爆坑发展的零时 $t_0 = 0.066\text{ms}$

对式 (5) 求导得到速度:
$$\frac{\partial h}{\partial t} = \lambda \frac{\lambda R_0}{\lambda R_0 + U_b (t + t_0)}$$

当 $t = t_0$ 时, $\partial h / \partial t |_{t=t_0} = U_b$

λ , R_0 , U_b 和 t_0 中只有3个独立变量。 R_0 是装药半径, 实验中预先给定; t_0 是爆坑运动零时, 虽然要在实验中确定, 但它和爆坑运动无关。因此, 影响爆坑深度的参数只有 λ 或 U_b , 与炸药品种、介质性质及装药条件有关。这里我们得到了一个简单而重要的结论: 一个类似土岩爆破漏斗经验公式中 K 值影响爆坑深度的参量。

值得注意的是, 式 (5) 和文献 [4] 中饱和土爆炸空腔的发展规律本质上完全一样。文献 [4] 中的爆源是202型雷管, $\lambda = 3$, 初速 $U_b = 280\text{m/s}$ 。这表明淤泥中爆坑和土中爆炸空腔的形成机理一样或基本一样, 未明显出现临空面的影响。

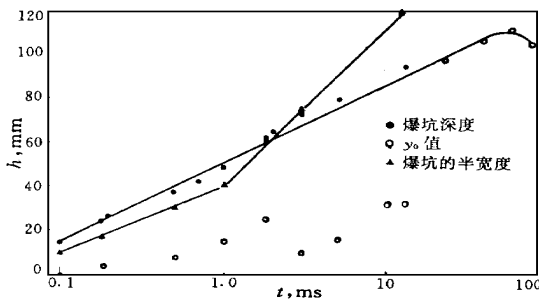


图4 爆坑参数随时间的变化

Fig. 4 Relationship between parameter of explosive cave and time

图4中爆坑半宽 r 的变化较为复杂。在 1ms 以前, $r < h$, 两线基本平行。 1ms 以后, r 增加较快; 在 2ms 以后, $r > h$; 这一情况自然和本实验装药条件有关。临空面的影响在 2ms 以后, 或爆坑达到60~ 80倍装药半径以后迅速显示出来。

图4中 y_0 的变化实验点十分分散。由于 y_0 表示该曲线水平对称轴的位置, 它对曲线形状——曲率的变化非常敏感。总体趋势是 y_0 随时间增加而增加。从图2照片可以看到, 爆坑轮廓线形状变化较大, 有时甚至不对称, 导致 y_0 数据较分散。其原因是实验中的淤泥很难做到均匀, 且 X 光摄影一炮只能得到一张照片, 同时装药位置的定位精度也存在实际困难。

3.4 爆坑发展零时 t_0

对于球形药包爆炸, 确定 t_0 不太困难。实验采用条形药包爆炸, 并且摄影方向重合于装药轴线。条形药包由远端起爆, 40cm 的导爆索需经 0.06ms 后, 另一端才能爆轰。所以, 在起爆后的较短时间内, 淤泥中形成的爆坑是锥形。这就是说, 爆炸初期 X 光拍摄的是沿光轴线上、整个爆坑断面的一个平均值。

在图4中, r 值在初始阶段比 h 约小 7mm 。理论上讲, 在我们的装药条件下 $h - r = R_0$ 。但是, 条形药包特别是用导爆索作爆源时, 这是达不到的。因为导爆索的任何弯曲其效果都导致爆源尺度的增加。此外, X 光机的光轴也不可能和导爆索的中心线完全重合。再加上作为爆坑深度标准的泥面也不可能完全弄平, 这些都导致实验误差的增加。因此, 我们不能把 R_0 取成 7mm 。如果把导爆索外皮算成装药包装, 取 $R_0 = 2.5\text{mm}$ 似可接受。这时在 $r - t$ 关系曲线上, 对应初始时间 $t_{01} = 0.064\text{ms}$, $R_0 + 7\text{mm} = 9.5\text{mm}$; 在 $h - t$ 关系曲线上对应的 $t_{02} = 0.068\text{ms}$ 。取平均值则 $t_0 = 0.066\text{ms}$, 此时记 r 为 r_0 , h 为 h_0 。由于 $r_0 = 2.5\text{mm}$, 按我们的装药条件, $h_0 = 5\text{mm}$ 。由此可以看到, h 值的误差约为 5mm , 而且是正值。

由于 $t_0 = 0.066\text{ms}$, 这时 50mm 导爆索 (在淤泥表面上 40mm) 即将爆完, 这就是我们取

爆坑发展零时的意义。

3.5 爆坑回缩

图4中 $h-t$ 关系曲线上 $t=60\sim 80\text{ms}$ 时, 可以清楚地看出爆坑回缩, 爆后实测稳定爆坑深度为 103mm , 爆坑回缩的尺寸约为爆坑深度的 10% 。爆坑回缩的原因包括重力、爆坑内负压和弹性恢复力的作用, 爆炸装置的振动也可能有影响。重力作用不仅是 10mm 淤泥深度, 还应包括爆坑外被挤出的淤泥高度。若在 60ms 内, 爆炸产物的冲出尚未得到气体回流的补充, 则爆坑底部出现负压。由于粘性阻力是运动阻力, 它不可能造成爆坑回缩, 只是降低爆坑的发展速度。

4 结论和问题

(1) 在本实验条件下, 爆坑轮廓线可用椭圆方程描述; 方程的 y_0 、 a 、 b 可用爆坑深度、爆坑宽度和水平对称轴的位置来确定。

(2) 最大瞬态爆坑深度为 $70\sim 80$ 倍药芯半径, 最大瞬态爆坑宽度约为 200 倍药芯半径。

(3) 爆坑深度发展曲线可用对数关系描述, 其形式与饱和土中爆炸空腔发展曲线完全相同, 这表明两者的发展机理可能相同。曲线只有一个参数需用实验确定。

(4) 在本实验装药条件下, 爆坑宽度发展曲线分成两段: 初期, 深度曲线和宽度曲线在半对数坐标中平行; 后期, 宽度曲线发展较快。临空面对爆坑宽度的影响在爆坑宽度达到 $60\sim 80$ 倍药芯半径后迅速反映出来, 但对爆坑深度的影响不明显。

(5) 本实验中爆坑发展的零时应在导爆索基本爆完的时刻, 这时锥形爆坑即将形成。实验中发现爆坑回缩现象, 回缩尺寸为爆坑深度的 10% 。

X 光机测试是在杨业敏先生协助下完成的。在完成本文过程中, 得到许连坡先生的指导。在此, 作者深致诚谢。

参 考 文 献

- 1 许连坡. 填石排淤法中的爆炸作用·爆炸与冲击, 1992, 12 (1): 54~ 61.
- 2 杨振声, 邢维复等. 爆炸条件下冲击波在淤泥中传播的规律. 工程爆破文集 (第四辑). 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- 3 邢维复, 任京生等. 淤泥爆坑与表面条形药包装药处理软基的实验研究. 工程爆破, 1997, 3 (3): 23~ 28.
- 4 许连坡. 土中爆炸空腔的发展过程. 力学学报, 1982, (5): 500~ 504.

(收稿日期: 1997-11-12)