

# 淤泥、岩土中爆炸鼓包运动规律的研究

李世海 许连坡 徐小鸿

(中国科学院力学研究所 北京 100080)

**摘要** 本文分析了水、淤泥和岩土中爆炸的共性、特性以及不同尺度下的实验结果,讨论了岩土、淤泥中爆炸的运动规律,给出了描述气体膨胀及鼓包运动的特征时间。指出岩土中爆炸的鼓包运动主要是高压气体膨胀和介质惯性运动的结果。总结了鼓包顶点的运动速度和炸药能量间的关系。从中可以发现岩土的强度对鼓包运动的影响不大;或者说,岩土中爆炸的能量利用率与淤泥中爆炸的差别不大。

**关键词** 鼓包运动; 岩土; 淤泥; 特征时间; 比能量

**中图分类号** TD 235.1

## 1 前言

在爆炸荷载作用下岩土有着复杂的力学性质。对不同的工程、地质条件和岩土特性,岩土中爆炸的力学性质又有较大的差异。面对复杂的问题,人们用简单的设计准则,完成了许多工程项目,取得了令人满意的结果。那么,岩土强度对爆炸荷载下鼓包的运动影响有多大?一直是爆破设计人员关心的问题。

近年来开展了许多有关淤泥中爆炸的研究工作<sup>[1][2]</sup>,将淤泥中爆炸与早期岩土中爆炸的鼓包运动的实验结果<sup>[3]</sup>进行比较,分析鼓包运动的规律,有益于提高对岩土中爆炸机理的认识。

本文分析了水、淤泥和岩土中爆炸的共性、特性,比较了不同介质、不同尺度下实验结果,讨论了淤泥、岩土中爆炸的运动规律,给出了描述气体膨胀及鼓包运动的特征时间。指出了岩土中爆炸的鼓包运动主要是高

压气体膨胀和介质惯性运动的结果。总结了鼓包顶点的运动速度和炸药能量间的关系,从中可以发现岩土的强度对鼓包运动的影响不大,或者说,岩土中爆炸的能量利用率与淤泥中爆炸的差别不大。研究结果对工程设计和数值模拟校核有参考价值。

## 2 实验现象及分析

### 2.1 浅水中爆炸

在浅水中爆炸的实验中,我们一般都能观察到“二次水柱”的现象,即炸药爆炸后水面上首先产生白色雾状水柱,过很短的时间,水柱下面再次升起水柱,与第一次水柱不同,第二次的水柱不再是雾状,上升高度也较低。当药包与水底较近时,水柱中还有底板上的泥浆或碎石,另外,第二次水柱还伴随着爆炸气体。

两次水柱反映了水下爆炸的两种运动过程,白色雾状水柱是由冲击波到达水面产生的拉伸波造成的。冲击波作用时间短、速度

收稿日期:1996—09—20

快,因此水表面上仅有少量的水高速上升,形成雾状水柱。第二次水柱是由爆炸后高压气体与水相互作用造成的,被水包围的高压气泡迅速膨胀,推动周围流体作加速运动,达到一定时间后气泡破裂,有气体逸出。二种运动机理属于不同的力学问题,前者是波的传播,后者属流体动力学问题。

关于浅水中爆炸的气泡运动,早在 1947 年人们就拍摄到了气泡运动的照片。从照片上可以清晰地看到,气泡的形状在爆炸后的较长时间内保持为球形。事实上,炸药爆炸后产生的高压气体被周围的流体所包围而形成高压气泡,一般说来,气泡内的压力基本相等。气泡表面的运动与周围流体的速度有关,而流体的速度取决于作用在流体上的压力差。气泡上部与下部的静水压力差为  $\rho g d$ ,  $\rho$  为水的密度,  $g$  为重力加速度,  $d$  为气泡直径。很显然,即使气泡扩张 10 m,  $\rho g h$  也仅有一个大气压力差。这种压力差与初期高压气泡的压力相比可以忽略,对气泡膨胀的影响不大,这也就是浅水中爆炸高压气泡为球形的原因。

## 2.2 淤泥中爆炸

一般说来,淤泥的强度很低,以我们研究的连云港海底淤泥为例,剪切角为  $5^\circ$ ,凝聚力为 500Pa。文献<sup>[1]</sup>将该淤泥描述为粘性流体。试验发现<sup>[5]</sup>淤泥中的声速为 1550 m/s,略高于水中声速,说明连云港淤泥的可压缩性与水接近。

在淤泥爆炸的实验中,淤泥表面上由冲击波拉出的“毛刺”很少。当比药量较低时,能够清楚地观察到鼓包的轮廓。若在泥面上铺一层软纸,毛刺现象即可消失。在淤泥表面上设置一些标志点,爆炸过程中,这些标志点的轨迹大致垂直于初始泥面,体现了爆炸荷载作用下的淤泥的流动特性。

## 2.3 岩土中爆炸

岩土中爆炸,人们通常看不到冲击波到达岩土表面后产生的“毛刺”现象,主要是因为冲击波在岩土中衰减速度较快以及岩土的抗拉强度远大于水和淤泥。

研究岩土中爆炸空腔的发展,王鸣渠<sup>[6]</sup>给出了实验室砂中爆炸椭圆空腔的轮廓。许连坡<sup>[7]</sup>实验研究了土中爆炸空腔的发展规律及裂隙的特征。Cherry<sup>[8]</sup>做了岩土中爆炸的数值模拟,数值计算结果表明,高压空腔开始为球形,短时间内,气泡只有向上的运动不再向下扩张,从而形成椭圆空腔。在大尺度的爆破实验中,人们还发现爆炸后药包下方形成了半径不大的半球形压缩圈。

综合分析可知,水、淤泥和岩土中爆炸均可看作含有两个力学过程,即冲击波的传播过程和高压气泡扩张及介质运动过程。而在后一过程中,不同介质中爆炸,高压气泡又都具有一个球形的阶段,这是我们较为统一地研究不同介质中爆炸的基础。

水和淤泥中爆炸介质的运动是非常相似的,但是,实验中由于“毛刺”现象观察不到水的鼓包运动,研究淤泥中爆炸的鼓包运动就更为有意义。

淤泥和岩土就介质本身的性质而言,有着本质的差别,淤泥呈流体特性,岩土呈固体特性。那么在爆炸荷载下,不同介质的鼓包运动,其差别有多大呢?

岩土中爆炸,爆炸冲击波可以使岩体中的裂隙扩张,岩体强度降低。在爆炸初期,空腔内的气体压力远大于岩体的强度,这时岩体的强度可以忽略,在这一阶段,在爆炸近区,岩土中的爆炸和淤泥中的有着相同的特征;在爆炸远区(包括地表附近),本来抗拉强度很低的岩体(新鲜岩在 1.5MPa 左右),受冲击波作用后,在爆炸荷载的推动作用下,岩

体表现为松散体的特性。在以后的时间内,空腔内的压力逐渐降低,直至达到负压,岩体以松散体的形式运动。对松散体而言,原来岩体的强度已失去意义,对鼓包运动的影响主要表现在散体的惯性及散体岩块之间的摩擦。如果认为岩块间的摩擦和淤泥的粘性对鼓包运动的影响不大的话,那么淤泥和岩土中的爆炸鼓包运动将遵循相同的规律,都表现为高压气体作用后的介质的惯性运动。

### 3 基本假设

基于以上讨论,研究淤泥、岩土中爆炸的鼓包运动,作如下假设:

(1) 淤泥、岩土为不可压缩介质,鼓包高

出初始地面的体积等于高压空腔的体积。

(2) 高压空腔内的气体满足状态方程  $PV^r = \text{常数}$ ,  $r = \frac{4}{3}$ 。

(3) 炸药用于推动介质运动的能量占炸药总能量的 50%。

(4) 认为岩土是各向同性的。

(5) 不考虑高压气体在岩体中渗流对岩体运动的影响。

(6) 高压气泡内的初始压力满足

$$P_0 = \frac{(r-1)Q_c Q}{2V_0} \quad (1)$$

其中,  $Q_c$  为爆热(J/kg),  $Q$  为炸药质量(kg),  $V_0$  为药包体积( $m^3$ ),  $r$  为爆热指数(气体多方指数)。

表 1 不同介质中爆炸鼓包三个运动段的时间比较

实验名称	介质	药量 (kg)	埋深 (m)	$V_s$ ( $m^3$ )	$t$		
					$t_v$	$t_e$	$t_w$
连云港 实验	淤泥	0.0115	0.22	0.001	0.0011~ 0.0022	0.0022	0.12
连云港 工程	淤泥	12.0	20	6.16	~0.013	~0.013	0.076
连云港 工程 Pre	淤泥 粘土	20.0	2.0	10.22	0.013~ 0.026	<0.013	0.063
GONDOLA	页岩	19 620	12.9	7 560	0.05	0.057	0.20

### 4 鼓包运动分析及特征时间

#### 4.1 鼓包运动分析

在抵抗线小于 40 m 的爆破工程中,鼓包开始作加速运动,短时间后,鼓包运动趋于平稳。人们把前一运动段称为“加速运动段”,而后一运动段称为“匀速运动段”。观测淤泥中爆炸的鼓包运动过程,也可以看到明显的

“匀速运动段”。如何解释鼓包运动的这种现象,我们首先分析淤泥中爆炸高压气泡内的压力与鼓包运动之间的关系。按照 2.3.6. 假设,当空腔内的压力降至药包处的静水压时,空腔的体积为

$$V_s = \left( \frac{P_0 V_0}{P_s} \right)^{1/r} \quad (2)$$

其中,  $P_s$  为药包处的静水压力。现在我们根据实验拍摄的鼓包运动图像,分析淤泥、

岩土中爆炸鼓包作加速和匀速运动的时间分界及讨论鼓包运动的机理。

具体作法如下:

(I) 由关系式(2)求出空腔内压力为静水压力时的体积  $V_s$ 。

(II) 由鼓包轮廓线计算某一时刻(某一幅图像)鼓包高出初始地面的体积。即鼓包体积。

(III) 找出鼓包体积接近于  $V_s$  时的时间  $t_v$ 。由于在查找到的试验中,高速摄影的拍摄频率较低,准确的找到  $t_v$ ,使  $V(t_v) = V_s$  比较困难。在这里,只能给出近似值,其误差小于拍摄相邻两幅照片的时间间隔。

(IV) 从鼓包运动图像上找出鼓包开始作匀速运动的时间  $t_e$ 。

(V) 分析试验结果,比较  $t_v$  和  $t_e$  值。

(VI) 给出鼓包到达一倍抵抗线距离的时间  $t_w$ ,并与  $t_e$  比较。

通过分析,我们可以看到:

(1) 高压气泡内的压力降到静水压的时间  $t_w$  与鼓包开始作匀速运动的时间  $t_e$  具有相同的量级。这表明,无论是淤泥还是岩土中爆炸,高压气体膨胀是导致鼓包运动的主要原因。

(2) 比较  $t_w$  与  $t_e$  可知,与整个鼓包运动过程相比,高压气泡降至静水压力的时间较短。换句话说,鼓包破裂时,“高压”空腔早已成为负压空腔了,鼓包运动的大部分时间是处在没有推动力的运动状态。

#### 4.2 特征时间

通过对鼓包运动轮廓线的分析,可以将鼓包的加速运动与高压气泡内的压力联系起来。为了找到更为普遍的规律,我们引入特征长度和特征时间:

$$L_b = \left[ \frac{Q_c Q r_0^{3(\gamma-1)}}{P_s} \right]^{\frac{1}{3\gamma}} \quad (3)$$

$$t_b = \sqrt{\frac{L_b H_w \rho_w}{Q_c \rho_c}} \quad (4)$$

其中,  $Q_c$  为炸药比能(J/kg),  $Q$  为药量(kg),  $r_0$  为药包起始半径,  $\gamma$  为爆炸气体多方指数,  $P_s = \rho_w g H_w + P_0$ ,  $P_0$  为大气压,  $g$  为重力加速度,  $\rho_w$  介质密度,  $\rho_c$  为炸药密度,特征长度  $L_b$  表征了高压空腔膨胀的尺度与最小抵抗线相比,它包含了炸药、药量及静水压力等因素,更能反映介质的运动过程。

利用关系式(3)(4),分析 34 组实验结果,见表 2。

表 2 鼓包加速运动段的特征时间

Q (kg)	$Q_c$ (J/kg)	$\rho_c$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_w$ (kg/m <sup>3</sup> )	$H_w$ (m)	$t_e$ (s)	$L_b$ (m)	$t_b$ (s)	$t_e/t_b$
19 620	$6.27 \times 10^6$	1000	1700	12.95	0.04	28.36	0.010	4.0
2.0	$3.07 \times 10^6$	800	1555	2.0	0.013	3.12	0.0019	6.84
12	$3.07 \times 10^6$	800	1555	2.0	0.013	2.64	0.0017	7.65
0.0015	$4.18 \times 10^6$	1000	1555	0.22	0.0011	0.283	0.00017	6.47
0.006	$6.27 \times 10^6$	1000	1555	0.16	0.0011	0.251	0.00011	10.0

从表2可以看出,对不同类型的试验, $t_e/t_b$ 有相同的量级。这表明,我们可以用 $t_b$ 描述鼓包在爆炸初期加速过程中所用的时间。当然,由于所研究的实例较少,各类试验拍摄鼓包初期运动的时间间隔也较长, $t_b$ 的实用性有待于更多的实验验证。

### 5 淤泥、岩土中爆炸的运动能转换及鼓包运动速度

爆破工作者对比药量 $Q/w^3$ ( $w$ 为抵抗线)的概念较为熟悉,它基本上反映了单位体

积的耗药量。研究不同类型的炸药在不同介质中爆炸时,使用比药量描述鼓包运动就不够全面。介质密度是反映运动惯性的主要参数,气泡内的压力还与所选取炸药的爆热有关。为此,我们引入比能量的概念,即炸药总能量与介质密度和药包埋深立方乘积之比: $\epsilon = Q_c Q / \rho H_w^3$ ,其中 $H_w$ 为药包埋深(m), $\epsilon$ 为比能量( $m^2/s^2$ )。可以看出,比能量反映了单位质量介质配炸药能量的多少。

爆炸后的鼓包运动是一部分爆炸能量转化为动能的过程。表3给出了一组实验结果:

表3 鼓包顶点运动速度与炸药比能量的关系

实验过程或代号	Q (kg)	$H_w$ (m)	$\rho$ ( $kg/m^3$ )	$Q_c$ (J/kg)	$\sqrt{\epsilon}$ (m/s)	v (m/s)	$v/\sqrt{\epsilon}$
Charlie	19 620	12.95	1 700	$6.37 \times 10^6$	182.54	67	0.37
Bravo	19 630	14.10	1 700	$6.27 \times 10^6$	159.64	53	0.33
ALFA	20 350	16.07	1 700	$6.27 \times 10^6$	134.48	45	0.33
DETLA	20 240	17.34	1 700	$6.27 \times 10^6$	119.68	39.6	0.33
SC-1	453.6	5.8	1 700	$6.27 \times 10^6$	92.54	30.14	0.325
SC-2	453.6	4.8	1 700	$6.27 \times 10^6$	123.00	52.84	0.43
SC-3	453.6	7.0	1 700	$6.27 \times 10^6$	69.83	20.5	0.29
SC-4	453.6	3.7	1 700	$6.27 \times 10^6$	181.73	64.9	0.36
Scooter	$450 \times 10^3$	38	2 000	$4.28 \times 10^6$	130.92	47	0.36
连云港工程	20	2.0	1 555	$3.48 \times 10^6$	74.84	31.6	0.42
连云港工程	12	2.0	1 555	$3.48 \times 10^6$	57.93	24.7	0.43
连云港实验室	0.0115	0.20	1 555	$4.18 \times 10^6$	62.16	24.5	0.39
连云港实验室	0.0115	0.22	1 555	$4.18 \times 10^6$	53.90	19.1	0.35
连云港实验室	0.0115	0.25	1 555	$4.18 \times 10^6$	44.50	12.9	0.29
连云港实验室	0.0115	0.18	1 555	$4.18 \times 10^6$	72.80	31.6	0.43
力学所实验室	0.0006	0.16	1 555	$6.27 \times 10^6$	76.85	25	0.33
龙首山试验炮	1 170	9.4	2 000	$3.64 \times 10^6$	50.63	15	0.30

图1给出了 $v-\sqrt{\epsilon}$ 的拟合曲线,拟合结果为 $v = 0.356065 \sqrt{\epsilon} + 0.197215$ 。可以看出,鼓包顶点的速度与能量的 $1/2$ 次方有较好的线性关系。考虑到试验观测到的速度范围在

15 m/s以上,拟合曲线中的第二项可忽略。由此,我们可以给出计算鼓包匀速段的速度公式:

$$v = K\sqrt{\epsilon} \tag{5}$$

其中,  $K$  值在 0.36 左右。

在(5)式中,  $K$  反映了爆破过程中动能的转化率。对不同的试验,  $K$  值的变化不大, 也说明了岩土中爆破岩土的强度对鼓包运动的影响不大。该结论也解释了在岩土抛掷爆破设计中广泛采用比药量公式的合理性。

关系式(5)利用比能量计算鼓包运动速度, 使用方便, 适用范围大。对抛掷爆破施工设计具有参考价值。

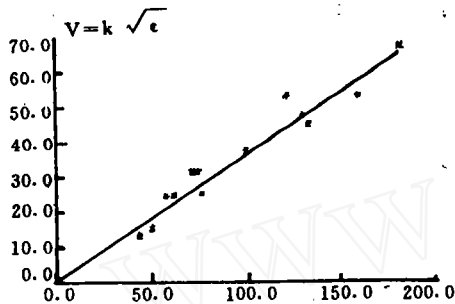


图1  $v$  与  $\sqrt{\epsilon}$  的拟合曲线

## 6 结论

通过对水、淤泥及岩土中爆炸的实验分

析, 我们讨论了淤泥、岩土中爆炸鼓包运动的机理, 得出如下结论:

(1) 淤泥、岩土中爆炸主要包括冲击波的传播及高压气体推动介质运动两个力学过程, 鼓包运动主要与高压气体膨胀和介质的惯性运动有关。

(2) 淤泥、岩土中爆炸的鼓包运动过程包括短时间加速运动和准匀速运动两个阶段。当气泡内的压力降到静水压的量级时, 鼓包不再做加速运动。关系式(3)(4)可用于描述鼓包作加速运动的时间, 给出较为准确的系数有待于更多试验验证。

(3) 鼓包作匀速运动的速度平方与比能量成正比。关系式(5)适用性强, 反映了惯性对鼓包速度的影响。该公式对爆破设计有一定的参考价值。通过实验分析研究淤泥、岩土中爆炸的机理有一定的工程意义和实用价值。我们充分认识到研究岩土中爆炸问题还有许多难以克服的困难, 这有待于进一步研究。本文的工作仅仅是在前人试验研究的基础上给出一个经验公式和定性的分析。

## 参考文献

- 1 许连坡, 顾道良, 李世海. 在淤泥中爆破的一些现象和问题. 爆炸与冲击, 1989, 9(4)
- 2 郑哲敏, 杨振声, 金缪. 爆炸法处理软基. 第四届全国工程爆破文集. 西安: 1989
- 3 Christoph ter W. G., J. E. Lattery. Crater Studies; Surface motion. AD-735671, 1969
- 4 Hussey G. F. Photography of underwater explosions in high photograph of bubble phenomena. AD-623828, 1946
- 5 杨振声. 爆炸条件下冲击波在淤泥中传播的规律. 第四届全国工程爆破文集. 西安: 1989
- 6 王鸿渠. Characteristics of Blasting Action and Charge Formula under Multi-boundary Conditions. Proceedings of the International Symposium on Intense Dynamic Loading and Its Effects. 1986
- 7 许连坡. Initiation and Development of Cracks Around the Cavity in Soil Blasting. 1986
- 8 Cherry, J. T. Computer Calculation of Explosion Produced Craters. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 4, ppl-22