

条形药包的空腔发展过程模拟

卢文波 朱传云 赖世骧 董振华

(武汉水利电力大学 武汉 430072)

摘要 通过分析条形药包爆破中等效单元球药包与岩土体中实际球药包间的不同特点, 计算了任一单元球药包的空腔发展过程, 为模拟条形药包的空腔发展过程提供了可供选择的途径。

关键词 条形药包 空腔 等效单元球药包 球药包

中图法分类号 TB41 TD235.1

1 引言

近年来, 条形药包在国内外各种工程爆破中得到广泛运用。由于这种装药结构应用时间短、实践经验不多, 我国对条形药包爆破的理论及实验研究还刚刚起步, 条形药包爆破中许多基本问题还未解决^[1,2]。这里, 我们仅对条形药包的空腔发展过程作一较深入的探讨。

在瞬间爆轰条件下, 国内外有些学者从理论分析和实验研究两方面对条形药包的空腔发展作了深入研究^[3,4,5]。由于沿条形药包轴向传播的爆轰波波速为一有限值, 瞬时爆轰假设必然存在一定误差。

由条形药包激发的应力波参数计算中, Starfield 等人^[6]提出以等效单元球药包迭加算法模拟爆轰波的传播。受到该模型的启发, 我们在引用无限岩体中球药包激发的应力波理论解基础上, 着重研究条形药包中等效单元球药包的特点, 通过获得任一单元球药包空腔的发展过程及其激发的应力波参数来解决整个条形药包的空腔发展模拟问题。

2 球形药包的空腔发展过程

球形药包激发的应力波理论解可参见文献^[7]得到。

在均匀、各向同性、线弹性介质中的一个球形药包引爆后, 该球腔将激发一球对称的弹性波。其径向位移 $u(r, t)$ 与势函数 $\varphi(r, t)$ 间的关系为

$$u(r, t) = \partial \varphi / \partial r \quad (1)$$

由文献^[7]推导得

$$\varphi(r, t) = \frac{-a_0}{\rho\beta r} \int_0^t p(s - \tau) e^{-\alpha\tau} \sin(\beta\tau) d\tau \quad (2)$$

上二式中: r, t 分别为位置与时间坐标, $a_0, \rho, p(t)$ 分别为球形药包空腔的初始半径、岩石密度和空腔的炮孔压力变化过程, 而 α, β 和 s 分别为

$$\alpha = \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} \cdot \frac{c_p}{\alpha_0} \quad (3)$$

$$\beta^2 = \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu^2} \cdot \frac{c_p^2}{\alpha_0^2} \quad (4)$$

$$s = t - \frac{r - a_0}{c_p} \quad (5)$$

式中: ν 为泊松比, c_p 为岩石中纵波速度。

由(1)、(2)式可得球腔周围岩石中任一点的位移表达式为

$$u(r, t) = \frac{a_0}{\rho\beta} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{\alpha}{c_p r} \right) \int_0^t p(\tau) e^{\alpha(\tau-s)} \sin[\beta(s-\tau)] d\tau + \frac{a_0}{\rho c_p r} \int_0^t p(\tau) e^{\alpha(\tau-s)} \cos[\beta(s-\tau)] d\tau \quad (6)$$

应该指出,在实际问题中 $p(t)$ 往往是未知的。此时需结合球形空腔内爆生气体的状态方程来逐步确定 $p(t)$ 和 $u(r, t)$ 。具体过程如下,球形空腔的体积 $V(t)$ 可表示为

$$V(t) = \frac{4}{3}\pi [a_0 + u(r, t)|_{r=a_0}]^3 \quad (7)$$

空腔内爆生气体的状态可表示为

$$p(t)[V(t)]^{\nu_0} = \text{const} \quad (8)$$

式中: ν_0 为爆生气体的绝热等熵指数。作为工程计算,设 p_k 为爆生气体的临界压力,则近似有

$$p(t) \geq p_k \text{ 时, } \nu_0 = 3.0; \quad p(t) < p_k \text{ 时, } \nu_0 = 1.4。$$

假设 t 时刻的 $u(r, t)$ 和 $p(t)$ 已知,计算的时间步长取为 Δt ,则由(7)式得到 $V(t + \Delta t)$,再由(8)式得到 $p(t + \Delta t)$ 。于是在已知空腔的初始爆压 p_0 时就可逐步计算空腔的压力变化历程 $p(t)$ 以及空腔的动力膨胀过程。

3 条形药包爆破中的等效单元球药包

在确定柱状装药激发的应力波参数时,为模拟爆轰波沿柱轴向的传播,Starfield 等人^[8]把柱状装药划分为一系列等效单元球药包来处理。受到该模型的启发,若我们能确定条形药包中任一等效单元球药包的空腔发展过程,也就等于确定了条形药包的空腔发展过程。

柱状装药中等效单元球药包的划分原则是系列等效单元球药包迭加后的总长度仍等于柱状装药长度。设等效单元球药包的半径为 r_c ,柱状装药半径为 r_c 。则有:

$$r_c = \sqrt{6} r_c / 2 \quad (9)$$

在 Starfield 算法中,半径为 r_c 的柱状装药所激发的应力波场即是系列具有等效半径 r_c 的球药包激发的应力波参数的时空迭加结果。

实验资料表明,条形药包产生的地震波主频率远低于具有相同半径的球药包所产生的地震波主频率,其计算值,前者仅是后者的 $1/6 \sim 1/10$ ^[8]。有些学者为使由 Starfield 迭加法获得的应力波参数(尤其是振动主频率)能与实验值一致,人为地将实际岩体中等效球药包激发的应力波振动主频率缩小为原来的 $1/6$,然后将其作为基本解输入^[8]。这从一

个侧面表明,实际岩体中等效球药包所激发的应力波参数与条形药包中的等效单元球药包所激发的应力波参数间存在差异.由此可见,我们有必要重新认识条形药包中的等效单元球药包。

实际上,条形药包中的等效单元球药包与岩体中具有等效半径的球药包间是有区别的.这种区别首先表现在两者的空腔发展过程中:实际岩体中具有等效半径的球药包的空腔发展完全受空腔的几何尺寸、装药参数、介质的动态特性参数和临空面等因素所控制.只要上述诸因素给定,该单元球状药包激发的球对称爆炸应力波的振幅、振动频率以及其他应力波参数也就完全确定.而对于条形药包中的第

i 个等效单元球药包而言,它受到先爆和后爆系列单元球状药包的综合作用(参见图 1),故其空腔的发展过程与岩体中实际球药包的空腔发展是不同的.由于这种空腔发展的不同,尽管用两类球药包引爆后具有相同的初始应力波参数,但它们输出的应力波参数间具有不同的频谱结构。

条形药包中的等效单元球药包与实际岩体中的等效球药包相比还有另一显著差异,那就是它们对炮孔壁岩体的初始加载过程不同.参见图 2(a),对于实际球状药包,因起爆点在球心,其腔壁在某瞬间同时受爆轰压力的作用;而对于条形药包中的等效单元球药包则不然,由于爆轰波沿柱轴向传播,对任一等效单元球药包而言并不是瞬间完成爆轰.如图 2(b),对具体的 i 药包,先是 AB 截面受到爆轰波作用,直至爆轰波由 AB 截面传至 CE 截面时才是第 i 个单元球药包初始加载过程的结束.实际球状药包和条形药包中的等效单元球药包间初始加载过程的不同,同样会导致它们激发的应力波频谱结构的差异,这将在后面的算例中进一步得到说明。

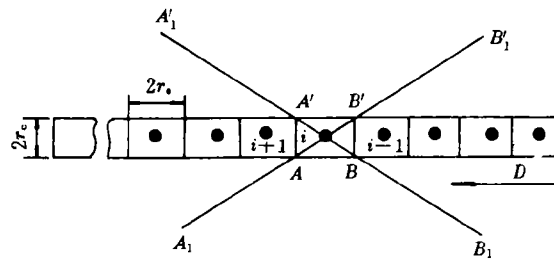
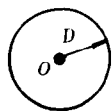
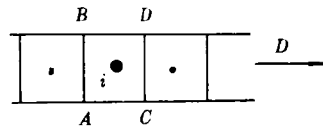


图 1 条形药包中的等效单元球药包
Fig. 1 The equivalent element spherical charge in cylindrical charge



(a) 实际球药包

(a) Real spherical charge



(b) 等效单元球药包

(b) The equivalent element spherical charge

图 2 两类球药包的初始加载过程示意图

Fig. 2 The initial loading process of two kinds of spherical charges

4 等效单元球药包的空腔发展计算

在炮孔的有效堵塞条件下,与炮孔内爆生气体的径向运动相比,爆生气体的轴向运动

往往可以忽略不计,因此对第*i*个等效单元球状药包(参见图 1),在 $A-A'$ 和 $B-B'$ 断面上可以近似认为没有能量传输,即第 $i-1$ 和 $i+1$ 个等效单元球药包对之有完全有效的堵塞作用。由此可见,对岩体而言,第 i 个等效单元球药包激发的应力波场的直接作用范围仅为区域 A_1ABB_1 和 $A_1'A'B'B'_1$ 。但是,在直达应力波传播的边界 B_1B 、 A_1A 、 B'_1B' 和 A'_1A' 需满足应力、位移和速度等的连续条件。若把边界点上质点运动分解为轴向和径向两个分量,同时假设条形药包具有足够的长度,且考虑系列单元球药包的综合效应,则可近似利用平面应变条件,即炮孔周围岩石介质的轴向运动可忽略。由此可见,对区域 $B_1OB'_1$ 和 A_1OA' 而言,第 i 个单元球药包激发的应力波的径向分量好象是一内传锥面波;通过该波,使第 i 个单元球药包激发的应力波场对条形药包中其他单元球药包空腔的动力膨胀产生影响。

如图 3,当第 i 个单元球药包激发的应力波传到 A 时,其径向运动的水平分量 v_h ,开始向炮孔方向传播。当 v_h 传至 B 时开始对第 k 个单元球药包的空腔膨胀产生影响。

A 点应力波参数可由第 i 个单元球药包激发的应力波场计算得到。现需由 A 点的运动反推 B 点的运动。作为近似计算,可以用内传锥面波波阵面上的几何扩散关系获得 B 点水平向运动(即空腔径向膨胀运动)的近似解。设 A 点的水平向运动速度为

$$v_h(A) = A_0 f(t) \tag{10}$$

则 B 点的水平向运动速度 $v_h(B)$ 为

$$v_h(B) = \left(\frac{R_A}{R_B}\right)^{\frac{1}{2}} A_0 f\left(t - \frac{R_A - R_B}{c_p}\right) \tag{11}$$

式中: R_A 、 R_B 为 A 和 B 点离条形药包空腔中轴线的径向距离, c_p 为纵波速度, A_0 为振幅。

必须指出,径向运动传至 B 点时,由于炮孔内是爆生气体,在 B 点必然会发生入射波的透反射。 B 点的入射波与反射波迭加后,其由 i 药包的起爆在 B 点引起的水平向(径向)运动速度可表示为

$$v_i(B) = R v_h(B) \tag{12}$$

若采用不耦合装药,近似有 $R=2$ 。

B 点的真实运动应该是所有先爆和后爆单元球药包的起爆在该点引起的运动加上 k 药包本身起爆引起的运动和迭加,故

$$v(B) = \sum_{i=1}^k v_i(B) \tag{13}$$

由前分析知,把短柱状装药 $ABB'A'$ 等效

为单元球药包后(参见图 1),其单元球药包的空腔仅能在 OAB 和 $OA'B'$ 区域内沿径向膨胀。易得

$$\angle BOB' = \angle AOA' = 2\arctg(r_c/r_e) = 78.464^\circ \tag{14}$$

故等效单元球药包的空腔体积可修正(7)式得到

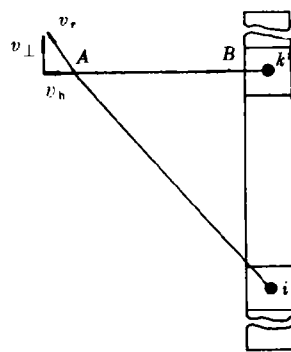


图 3 等效单元球药包引起的空腔膨胀

Fig. 3 The expansion of cavity caused by equivalent element spherical charge

$$V(t) = \frac{3}{4}\pi[a_0 + u(r, t)|_{r=r_0}]^3 f_1 + \frac{3}{4}\pi a_0^3 f_2 \quad (15)$$

其中: $f_1 = 0.564$, $f_2 = 0.436$ 。上式中的第二项 $(4/3)\pi a_0^3 f_2$ 代表 AOA' 和 BOB' 部分的空腔体积。 $u(r, t)|_{r=r_0}$ 为空腔孔壁处的位移, 它可由(13)式对时间的积分而得到。于是类似于第二节末的有关步骤, 可逐步计算空腔压力衰减过程和空腔动力膨胀过程。

5 算例与讨论

为了比较基于等效单元球药包模型和瞬时爆轰条件下空腔发展计算结果及其各自激发的应力波频谱结构间的差异, 我们曾用算例进行了计算^[9]。

在算例中, 岩石为页岩, 密度 $\rho = 2261 \text{ kg/m}^3$, 泊松比 $\nu = 0.271$, 弹模 $E = 17.83 \text{ GPa}$, 纵波速度 $c_p = 2808 \text{ m/s}$, 炮孔半径为 0.05 m , 装药爆速 $D = 3400 \text{ m/s}$, 炮孔初始压力 $p_0 = 26.3 \text{ MPa}$, 气体状态方程中的等熵指数 $\nu_0 = 1.4$ 。

由(9)式可得, 炮孔半径为 0.05 m 的条形药包的等效单元球药包的等效半径为 0.061235 m 。

在本算例中, 共计算了五种情况的空腔发展, 详见图 4~图 7。在各图中, r_s 为爆腔的瞬时半径, r_e 和 r_c 分别为等效半径和柱形炮孔的半径。图 4 是实际岩体中具有等效半径的球药包空腔的发展时程曲线; 图 5 和图 6 中的实线是基于等效单元球药包模型, 考虑单元球药包爆炸荷载初始加载过程(荷载线性上升时间为 $2r_s/D$, D 为装药爆速), 条形药包长度分别为 $6r_s$ 和 $22r_s$ 时, 计算得到的药包中截面位置上的空腔发展曲线; 图 7 中的实线是基于等效单元球药包模型, 不考虑单元球药包爆炸荷载初始加载过程时(即认为任一单元球药包的爆轰瞬间完成, 但相邻球药包的爆轰完成时间有一时差, 其值为 $2r_s/D$), 所计算得到的药包中截面位置处的空腔发展曲线; 图 6 和图 7 中的虚线则是在假定整个条形药包的瞬时爆轰条件下(相应于形成柱面波情况), 计算得到的相应空腔发展曲线, 其计算过程参见文献[10]。

由图 4 岩体中实际球药包的空腔发展过程曲线知, 在该空腔稳定以前, 空腔发展有一明显的膨胀→回弹→二次膨胀→……的过程, 但后次膨胀或回弹的幅值明显比前次减小, 而其周期却比前次增大。

由图 5~图 7 知, 在基于等效单元球状药包情况下, 装药中间位置处的空腔发展稳定值随装药长度的增大而增大; 在考虑爆炸荷载初始加载过程条件下, 计算出的爆腔最终尺寸小于瞬间爆轰条件下得到的值。

由图 6~图 7 的计算结果知, 在整个条形药包的瞬时爆轰条件下, 用柱面波理论计算得到的空腔发展稳定值(此时, $r_s/r_c = 1.160$), 大于基于等效单元球药包模型下, 考虑单元球药包爆炸荷载初始加载过程时所得到的相应值(此时, $r_s/r_c = 1.145$), 而小于基于等效单元球药包模型下, 不考虑单元球药包爆炸荷载初始加载过程时所计算得到的空腔发展稳定值(此时, $r_s/r_c = 1.174$)。从理论上说, 用柱面波理论计算得到的空腔发展稳定值应该是实际值的上限。由此可见, 基于等效单元球药包模型下, 计算条形药包空腔的发展过程时, 考虑单元球药包爆炸荷载的初始加载过程是必须的。

为了进一步比较各种模型下计算得到的爆炸应力波的频谱构成, 我们对各种方法下

所得的空腔孔壁处的膨胀运动作了频谱分析,其计算结果参见表 1。

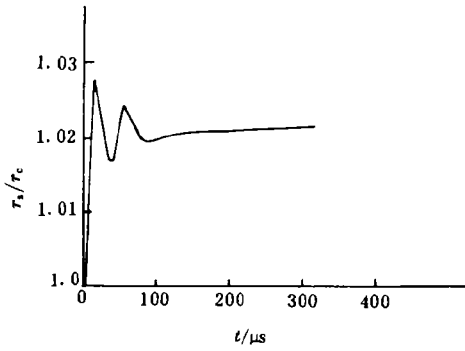


图 4 实际球药包的空腔发展
Fig. 4 The cavity expansion of real spherical charge

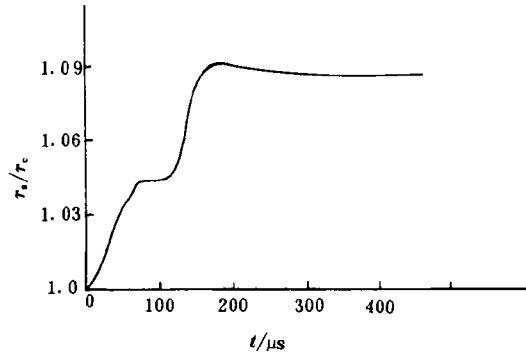


图 5 长度为 $6r_c$ 的空腔发展(考虑初始加载)
Fig. 5 The cavity expansion of cylindrical charge with a length of $6r_c$ (with a initial loading process)

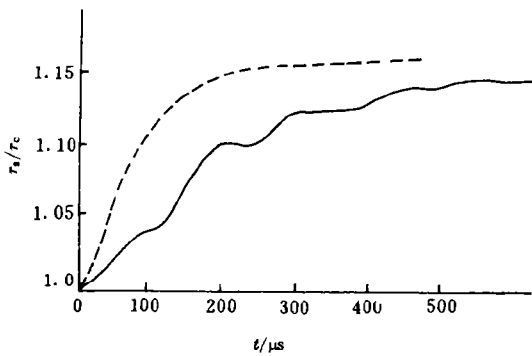


图 6 长度为 $22r_c$ 时的空腔发展(考虑初始加载)
Fig. 6 The cavity expansion of charge with a length of $22r_c$ (with a initial loading process)

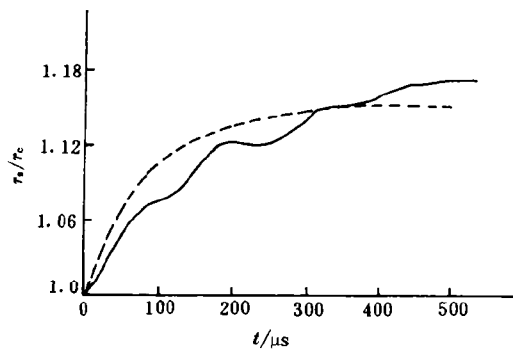


图 7 长度为 $22r_c$ 时的空腔发展(不考虑初始加载)
Fig. 7 The cavity expansion of charge with a length of $22r_c$ (without a initial loading process)

表 1 空腔膨胀运动的频谱分析结果

Table 1 The result of frequency spectrum of borehole expansion

	实际岩体中的球药包	等效单元球药包(初始加载过程)	等效单元球药包(瞬时爆轰)	条形药包(形成柱面波)
径向运动幅值/(m/s)	72.0	152.5	185.3	155.8
振动主频/HZ	11464	1862	1562	1755

由表可知,等效单元球药包与实际岩体中球药包的空腔发展间存在着巨大差异。两种空腔壁处尽管作用有相同的初始应力波参数,但它们激发的爆炸应力波间却有差异巨大的频谱构成。对于等效单元球状药包,考虑腔壁上爆炸压力的初始加载过程是必须的,否

则其计算结果将超出合理范围,即其计算幅值将大于理论上限、而其振动主频则小于理论下限。在本算例中,条形药包激发的爆破振动主频约为具有等效半径的球药包激发的爆破振动主频的 $1/6.2$,这符合以往实测或理论计算值^[8]。由此可见,所提出的方法是合理可行的。

需要指出的是,基于等效单元球药包的空腔发展分析的理论前提是线性迭加原理的成立,这只有在采用较大的装药不耦合系数情况下才是适用的。若装药引爆后,炮孔近区出现了流动或塑性区,我们所建议的方法将不再有效,这项工作,还有待于进一步研究。

参 考 文 献

- 1 冯叔瑜,金骥良,杨年华. 延长药包爆破现状的分析研究. 见:霍永基主编. 工程爆破文集(第五辑),武汉:中国地质大学出版社,1993. 4~9
- 2 杨年华. 条形药包爆破与现状. 爆炸与冲击,1994,14(3):242~248
- 3 J亨利奇著. 爆炸动力学及其应用. 熊建国,等译. 北京:科学出版社,1987.
- 4 龙源,林学圣,许连坡. 条形装药中爆破空腔发展过程的实验研究. 爆炸与冲击,1988,8(3):227~232
- 5 龙源. 条形装药土中爆炸冲击波及空腔的数值模拟. 爆炸与冲击,1990,10(1):41~47
- 6 Starfield A M, Pugliese J M. Compression Waves Generated in Rock by Cylindrical Explosive Charges: A Comparison between a Computer and Field Measurements. Int J Rock Mech Min Sci, 1968,5(5):65~77
- 7 Achenbach J D 著. 弹性固体中波的传播. 徐植信,洪锦如译. 上海:同济大学出版社,1992.
- 8 Harries G. The Modelling of Long Cylindrical Charge of Explosive. In: Holmberg R, Rustan A, eds. 1st Int Symp on Rock Fragmentation by Blasting, Sweden; Published by Luleå University of Technology, 1983. 419~481
- 9 卢文波. 岩石爆破中应力波的传播及其效应研究.[博士论文]. 武汉:武汉水利电力大学,1994
- 10 卢文波,陶振宇. 预裂爆破中炮孔压力变化历程的理论分析. 爆炸与冲击,1994,14(2):140~147

SIMULATION OF CAVITY EXPANSION WITH STRIP-SHAPED EXPLOSIVE CHARGE

Lu Wenbo, Zhu Chuanyun, Lai Shixiang, Dong Zhenhua

(Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, Wuhan, 430072)

ABSTRACT Through analyzing the differences between the real spherical in rock or soil and the equivalent element spherical charge (EESC) of strip-shaped explosive charges and simulating the cavity expansion of any EESC, we provide an alternative way to simulate the cavity expansion with strip-shaped explosive charge.

KEY WORDS strip-shaped explosive charge, cavity, equivalent element spherical charge, spherical charge