

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0236

## 轴向分布式药包激发地震波场模型\*

徐 谦, 王仲琦

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 炸药震源激发地震波场幅频特性直接影响地震勘探精度, 本文通过计算研究轴向分布式药包激发地震波场幅频特征规律: 以球形空腔震源模型为基础, 采用叠加方法获得轴向分布式药包激发地震波场计算方法, 并与数值模拟结果进行对比。研究表明: 该方法误差在 7% 以内; 在爆心距大于药柱总长度 9.8 倍时轴向分布式药包所激发地震波速度场与球形药包基本一致, 但地震波的频率更高。

**关键词:** 地震波; 地震勘探; 炸药震源; 轴向分布式药包

中图分类号: O382.2 国标学科代码: 13035 文献标志码: A

### Model of seismic wave field excited by axially distributed explosive

XU Qian, WANG Zhongqi

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The amplitude-frequency characters of the seismic wave excited by the explosive source directly affect the seismic exploration accuracy. In order to reveal the characteristic law of the amplitude and frequency of the seismic wave field excited by an axially distributed explosive, the study on the calculation method of the seismic wave field of the axially distributed explosive was proposed. Based on the spherical cavity source model, the calculation method of the seismic wave field excited by the axially distributed explosive source was obtained by using the superposition method, and the seismic wave field model excited by the axially distributed charge was established. This model can describe the characteristics of the seismic wave field of distributed explosive sources in seismic exploration. Comparison with numerical simulation shows that the error between the theoretical model and the numerical model is within 5% in the radial direction, and the error between the theoretical model and the numerical model is within 3.4% in the axial direction. Compared with the field experiment results, the theoretical model seismic wave vibration velocity error is within 10% when the blast center distance is greater than 14 m. The calculation accuracy increases with the increase of the distance, and the error is less than 6% when the distance is greater than 24 m. When the blast center distance is the same, the vibration speed in the axial direction is greater than the vibration speed in the radial direction. The difference between the two decreases with the increase of the blast center distance. When the blast center distance is 9.8 times the total length of the charge, the axial direction is the vibration speed difference in the radial direction is within 5%, and the frequency of the seismic wave is higher. The research shows that the model can accurately describe the amplitude-frequency character of the seismic wave excited by the axially-distributed explosive.

**Keywords:** seismic wave; seismic exploration; explosive source; axially distributed explosive

炸药震源是油气勘探中人工激发地震波的主要震源<sup>[1]</sup>。炸药起爆时产生大量高温、高压气体直接作用于岩土介质上, 在紧邻炸药区域造成剧烈的破坏并形成爆腔, 随着爆炸冲击波发展, 超压值迅速降低直至低于岩土介质破坏强度, 在岩土介质中形成地震波<sup>[2]</sup>。其中, 炸药震源性质会影响气体爆压大小

\* 收稿日期: 2020-07-03; 修回日期: 2020-09-07

基金项目: 国家科技重大专项(2016ZX05006-002)

第一作者: 徐 谦(1993—), 男, 博士研究生, chinaxuqian@126.com

通信作者: 王仲琦(1972—), 男, 博士, 副教授, czqwang@bit.edu.cn

及作用时间,不同类型的炸药会形成不同的爆腔,此外,药包外形还会影响爆腔的几何形状。由于爆腔性质决定了地震波的特性,因此可以认为炸药震源对地震波特征具有重要的影响作用。

为了研究炸药震源形成地震波的过程,Jeffreys<sup>[3]</sup>最早建立一维空间内空腔振动模型,给出球面脉冲下全空间空腔问题的解答。Sharpe<sup>[4]</sup>对球形封闭空间内爆炸产生的子波进行研究,获得了爆炸空腔壁面压力的弹性波解析解。Blake<sup>[5]</sup>针对点源爆炸理论模型在 Sharpe 的研究基础上获得了非泊松体的弹性波的解析解。肖建华等<sup>[6-7]</sup>基于球面波在各向同质介质的传播特征,获得炸药震源形成球面波振幅和波形;丁桦等<sup>[8]</sup>通过等效载荷模型开展爆破振动研究,发现其理论结果与实际情况相符;林大超等<sup>[9]</sup>针对炸药在岩土中的爆炸过程求解出爆腔中的压力解。这些球形空腔震源模型可以建立爆炸压力和弹性空腔半径与地震波场之间的关系,但是这些方法简化了炸药震源激发地震波的过程,无法建立炸药震源特征与地震波场幅频特征之间的直接关系。Yu 等<sup>[10]</sup>针对这一问题发展了空腔震源模型,建立了炸药震源激发地震波场理论模型,该方法描述了炸药震源的形成地震波的作用过程,建立了炸药震源初始参数与地震波场之间的关系,能够对球形药包全场地震波特征进行描述。

虽然球形空腔震源模型已经可以描述炸药爆炸地震波场的形成及变化,但是在地震勘探中会采用多段柱形药包作为震源,由于球形药包和柱形药包形成的地震波场特征并不相同,所以传统球形空腔震源模型在柱形药包形成的地震波场描述中并不适用。Heelan<sup>[11]</sup>针对有限长度的柱形药包激发地震波子波进行分析,得到柱形药包的地震波远场解。这种方法将炸药爆炸压力沿着药柱长度方向同时施加到激发介质上,是对无限长柱形药包形成地震波场进行直接求解,并不能精确描述有限长柱形药包的地震波场特征。Starfield 等<sup>[12]</sup>将长柱形药包视为多个短柱药包的叠加,进而对柱形药包端部起爆时的爆炸应力场进行了求解,计算结果与实验测试结果基本一致。龙源等<sup>[13]</sup>通过实验和数值模拟方法获得了柱形药包形成空腔机器发展过程。李鹏毅等<sup>[14]</sup>在于成龙等<sup>[15]</sup>的结果上通过球形药包叠加方法,提出了有限长柱形药包的地震波场模型。胡立新等<sup>[16]</sup>基于弹性波动理论,通过现场实验获得了延迟震源地震波场与药包类型、药量以及药柱间隔之间的关系。黄文尧等<sup>[17]</sup>和牟杰<sup>[18]</sup>对柱形药包的实验研究发现了间隔式柱形药包起爆的延迟时间对地震波场的影响。这些方法往往基于实验或者数值模拟方法对分布式药包形成的地震波特征进行探索,并不能明确描述轴向分布式药包与地震波场之间的理论关系。为了能够实现精细勘探的目的,达到通过改变炸药震源激发方案实现对地震波特征控制的目标,必须建立轴向分布式药包激发地震波场模型。

本文首先分析炸药震源激发地震波的整个过程,概略描述炸药震源激发地震波场的不同阶段;考虑到药包的空间结构,提出轴向分布式药包激发地震波场的计算方法;并通过现场实验数据验证该计算模型的适用性,并进一步分析轴向分布式药包在岩土中激发形成地震波场的演变过程。

## 1 炸药震源激发地震波过程分析

炸药从爆炸到最终在远处形成弹性波的过程伴随着一系列的化学与物理变化过程。由于各种耗散机制的作用,能量在传递过程中不断衰减,由最初具有很强能量的冲击波演变为最终的弹性波。该过程分为 4 个不同阶段,分别是:流体动力学阶段、岩土介质粉碎阶段、动态膨胀阶段和弹性波传播阶段。同时,衰减过程中介质在强爆炸作用下会发生一些不可逆变形,在爆源附近岩土介质在巨大的能量作用下表现出流体性质。在爆炸瞬间,爆室内部推出一个与炸药形状相同的波阵面,随着冲击波的发展,冲击波在向外传播过程中应力峰值急速衰减,直至应力值小于岩土极限破坏强度,此时岩土介质从流体受力状态转化为弹塑性受力形态,应力波的这种衰减一直持续到其峰值小于某个值后,岩土介质从塑性状态转化为弹性状态,由此在能量传递方向上炸药震源在岩土中爆炸时依次形成爆炸空腔区、塑性区和弹性区。但是由于柱形药包与球形药包在几何形状上的区别,导致各个区域的发展过程有所变化,柱形药包近场各区域与药柱形状相似,随着爆心距增加,柱形药包与球形药包形成的地震波场相似。轴向分布式药包形成的地震波场逐渐由椭球形向球形发展,直至最后形成与球形药包相似的波阵面,各区域的形状对比如图 1 所示。

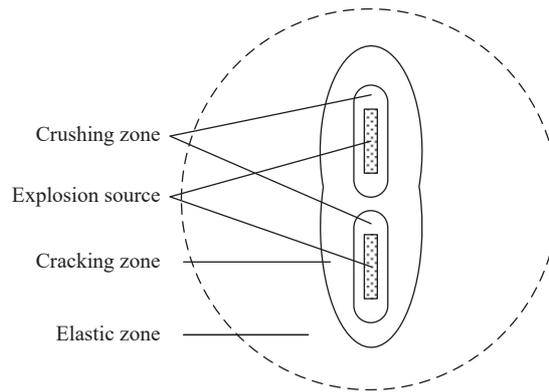


图 1 轴向分布式药包在岩土介质中爆炸分区

Fig. 1 Explosive zoning of an axially distributed charge in geotechnical media

## 2 轴向分布式炸药震源激发地震波场模型

### 2.1 球形炸药激发地震波场模型

球形空腔震源模型能够描述炸药震源与地震波场之间的关系。在该模型中, 炸药起爆瞬间产生大量高温、高压气体直接作用于岩土介质上形成爆腔。由于空腔中的气体压力远大于岩土介质的强度, 炸药附近的岩土介质在巨大的压力下呈现流体性质, 爆腔可以视为在不可压缩流体介质中进行扩张。随着爆炸冲击波在介质中的传播和衰减, 在距离震源一定距离处, 冲击波压力衰减至介质破坏强度以下时, 此时激发介质呈现弹性性质。于成龙等<sup>[15]</sup>假设爆轰过程和爆腔瞬间形成, 在土介质不可压缩并忽略性质改变条件下, 建立了球形药包爆腔预测准静态模型。通过该模型可以获得球形药包在岩土中激发时的爆腔半径和塑性区半径。爆腔半径为:

$$b = a_0 \left( \frac{p_0}{-\frac{c}{\varphi} + \left( \sigma_c + \frac{c}{\varphi} \right) L^{\frac{4\gamma}{3(1+\gamma)}}} \right)^{\frac{1}{3\gamma}} \sqrt[3]{\frac{2G}{3\sigma_c}} \quad (1)$$

其中:

$$L = \frac{G}{\sigma_c \left[ 1 + \ln \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \right]} \quad (2)$$

塑性区半径为

$$b_0 = \left( \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \right)^{\frac{1}{2}} b \quad (3)$$

式中:  $a_0$  为球形药包半径;  $p_0$  为炸药初始爆压;  $\gamma$  为炸药膨胀指数;  $\varphi$  为土介质黏聚力;  $\alpha$  为土介质内摩擦角;  $\sigma_c$  为土介质抗压强度;  $\sigma_t$  为土介质抗拉强度;  $G$  为拉梅系数, 在弹性介质中为剪切模量。

通过球对称和线性理论, 引入线性径向应变和环向应变, 质点位移  $u$  满足运动方程:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{2}{r^2} u = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (4)$$

该方程可以描述质点在黏滞阻尼下的受迫振动, 根据方程可以解出振动速度:

$$\dot{u}(r, t) = e^{-\eta^2 \tau / (\rho_s c b)} \left[ \left( \frac{p b^2 c}{\eta \kappa r^2} - \frac{\eta p b}{\kappa \rho_s c r} \right) \sin \frac{\eta \kappa \tau}{\rho_s c b_0} + \frac{p b}{\rho_s c r} \cos \frac{\eta \kappa \tau}{\rho_s c b_0} \right] \quad (5)$$

其中:

$$\eta^2 = \frac{2(1-2\sigma)\rho_s c^2 + 3(1-\sigma)\gamma p}{2(1-\sigma)}$$

$$\kappa^2 = \frac{2\rho_s c^2 - 3(1-\sigma)\gamma p}{2(1-\sigma)}$$

$$\tau = t - \frac{r-b_0}{c}$$

式中:  $\rho_s$  为土介质初始密度,  $\sigma$  为应力,  $p$  为压力。在上述方程中, 振动的频率为

$$f_1 = \frac{\eta\kappa}{2\pi\rho_s c b_0} = \frac{\sqrt{(8\rho_s c^2 - 9\gamma p)(4\rho_s c^2 + 9\gamma p)}}{12\pi\rho_s c b_0} \quad (6)$$

振动幅值为:

$$A_0 = e^{-\eta^2 T / (\rho_s c b_0)} \frac{p}{\eta\kappa} \frac{b_0^2}{2\rho_s c^2 r} \quad (7)$$

### 2.2 轴向分布式药包激发地震波场计算方法

轴向分布式药包由等长度的柱形药包沿着药柱轴向等间距布置组成。将每段柱形药包等效为多个球形药包叠加, 则轴向分布式药包可以视为多级连续球形药包间隔叠加。由于各段柱形药包空间位置不同, 不同球形等效药包与空间某点相对位置有差异, 每个药包引起的指定位置处的振动方向也不同, 所以需要各个球形药包引起的振动进行分解, 在  $x$  和  $y$  方向进行分别叠加后, 最终获得合速度。各段药柱需要满足以下条件: (1) 药包总体积和所有球形药包总体积相等; (2) 药包总长度和所有球形药包直径之和相等; (3) 爆轰过程的连续性, 各段柱形药包的等效球形药包间距为零。

如图 2 所示, 第  $m$  段的第  $n$  个球形等效药包爆炸地震波在  $A$  点的振动速度为  $\dot{u}_{mn}(r, t)$ ,  $x$  方向速度分量为  $\dot{u}_{mnx}(r, t)$ ,  $y$  方向速度分量为  $\dot{u}_{mny}(r, t)$ , 则

$$\dot{u}_{mnx}(r, t) = \dot{u}_{mn}(r, t) \frac{L_{mnx}}{r_{mn}} \quad (8)$$

$$\dot{u}_{mny}(r, t) = \dot{u}_{mn}(r, t) \frac{L_{mny}}{r_{mn}} \quad (9)$$

式中:  $L_{mnx}$ 、 $L_{mny}$  为第  $m$  段的第  $n$  个球形等效药包与  $A$  点的横向距离和纵向距离,  $r_{mn}$  为第  $m$  段的第  $n$  个球形等效药包与  $A$  点的实际距离。

那么第  $m$  段药柱在  $A$  处的振动速度在  $x$  方向分量  $\dot{u}_{mx}(r, t)$  和  $y$  方向分量  $\dot{u}_{my}(r, t)$  分别为

$$\dot{u}_{mx}(r, t) = \dot{u}_{m1x}(r, t) + \dot{u}_{m2x}(r, t) + \dots + \dot{u}_{mnx}(r, t) \quad (10)$$

$$\dot{u}_{my}(r, t) = \dot{u}_{m1y}(r, t) + \dot{u}_{m2y}(r, t) + \dots + \dot{u}_{mny}(r, t) \quad (11)$$

整个轴向分布式药包在  $A$  点处的振动速度在  $x$  方向分量  $\dot{u}_x(r, t)$  和  $y$  方向分量  $\dot{u}_y(r, t)$  分别为

$$\dot{u}_x(r, t) = \dot{u}_{1x}(r, t) + \dot{u}_{2x}(r, t) + \dots + \dot{u}_{mx}(r, t) \quad (12)$$

$$\dot{u}_y(r, t) = \dot{u}_{1y}(r, t) + \dot{u}_{2y}(r, t) + \dots + \dot{u}_{my}(r, t) \quad (13)$$

则合速度为

$$\dot{u}(r, t) = \pm \sqrt{\dot{u}_x(r, t)^2 + \dot{u}_y(r, t)^2} \quad (14)$$

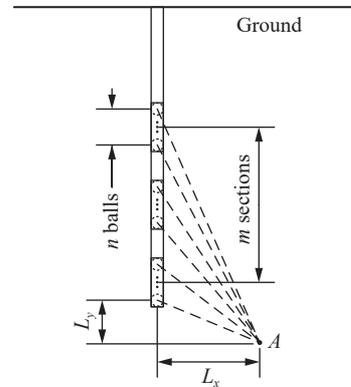


图 2 轴向分布式激发方案  
Fig. 2 Axial distributed excitation

轴向分布式药包激发地震波幅频特征与各个药包之间间隔和延时激发时间有密切关系,选择合适的激发间隔可以获得更大的能量。通过调整各段柱形药包激发的延迟时间,使第一段药柱激发的冲击波的压力峰值可以与第 2 段药柱激发冲击波峰值重叠,就可以达到最佳叠加效果。由于各段药柱从激发到冲击波达到峰值时间相同,所以认为最佳激发间隔等于各段药柱传爆时间与两段药柱之间的冲击波传播时间之和,即:

$$\Delta t = \frac{l}{D} + \frac{h}{c} \quad (15)$$

式中:  $l$  为每段药柱长度,  $h$  为药柱间距,  $D$  为炸药爆速,  $c$  为波速。

### 2.3 轴向分布式药包激发地震波场模型验证

由于特殊的几何结构,轴向分布式药包在土介质中激发的地震波在轴向和径向存在差异。在距离药包的近处,应力波波阵面会以各段药包的基本形状向外扩散,随着几何发散以及地震波在土中的传播,地震波特征在轴向和径向上表现并不相同。为了验证轴向分布式药包激发地震波场计算方法的有效性,本文采用了 3 种不同的激发方案对轴向分布式药包激发地震波场的理论计算结果与数值模拟计算结果在轴向和径向分别进行对比,详细的激发参数如表 1 所示。

表 1 轴向分布式炸药激发方案

Table 1 Excitation scheme of axially distributed explosives

方案	药柱数量	单药柱质量/kg	药柱间隔/mm	总药量/kg	延迟时间/s	激发方向
3 kg×2	2	3	400	6	0.3	由上而下
2 kg×3	3	2	400	6	0.3	由上而下
1.5 kg×4	4	1.5	400	6	0.3	由上而下

将理论模型的计算结果与有限元软件 Autodyn 计算结果进行对比。

在 Autodyn 模型中,土介质采用理想弹性模型,其状态方程为

$$p = k\mu \quad (16)$$

式中:  $\mu = (\rho/\rho_s) - 1$ ,  $\rho$  为土介质密度;  $k$  为体积模量。

土介质的强度模型采用 von Mises 强度模型:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_y^2 = 6G^2 \quad (17)$$

式中:  $\sigma_y$  为屈服强度,  $G$  为剪切模量。土介质参数见表 2。

表 2 土介质参数

Table 2 Parameters of soil

$\sigma_c$ /MPa	$\sigma_t$ /MPa	$G$ /GPa	$\alpha$	$\varphi$ /kPa	$\rho_s$ /(kg·m <sup>3</sup> )	$k$ /MPa	$G$ /MPa	$\sigma_y$ /MPa
13	2	0.147	0.115	11.8	1840	245	147	22

TNT 炸药采用理想爆轰产物标准 JWL 方程描述

$$p = C_1 \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V}\right) e^{-R_1 V} + C_2 \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V}\right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e}{V} \quad (18)$$

式中:  $e$  为爆轰能量,  $V$  为相对体积,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为状态方程参数。表 3 给出了 TNT 炸药的特性参数,其中  $\rho_e$  为炸药密度,  $D$  为爆速,  $p_{CJ}$  为炸药的 C-J 爆压,  $p_0$  为初始爆压。

在药包近区采用 Euler 方法进行单元网格划分,起爆点选取在药包中心位置, Euler 单元网格介质尺寸为 2 000 mm×1 000 mm,划分为 500×250 个网格。Lagrange 单元网格介质尺寸为 30 000 mm×30 000 mm,

网格划分为 250×250。在药柱轴向和径向 30 m 范围内分别设立观察点,并在两个方向上分别对比对应观察点处数值计算与模型计算结果。

表 3 TNT 炸药特性参数

Table 3 Parameters of TNT

$C_1/\text{GPa}$	$C_2/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$\rho_e/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$e/(\text{J}\cdot\text{m}^{-3})$	$p_{CJ}/\text{GPa}$	$p_0/\text{GPa}$
373.7	3.747	4.15	0.90	0.35	1650	6930	$6.0\times 10^9$	21	9.82

三种不同激发方案激发的地震波最大振动速度的理论计算结果和数值模拟结果对比如图 3 所示。在距离震源中心点较近位置处轴向的最大振动速度明显大于径向最大振动速度,这是因为轴向上各个药包激发的弹性波在叠加过程中不存在  $x$  轴方向上的抵消作用,并且轴向上与药包的距离比径向与炸药的距离更近。对比理论计算结果与数值模拟结果在相同爆心距位置处的最大振动速度,在轴向上,爆心距 12 m 以内差值较大,误差在 3%~7% 之间;两者差值随着爆心距增加而减小,当爆心距大于 22 m 时,差值在 3% 以内;在径向上,两者差值在 5% 以内。可以发现,在轴向上两者差距较大,这是因为端部效应导致理论计算结果偏大。随着爆心距增加,几何结构的影响逐渐降低,距离较远处差距逐渐减小。由于土介质吸收衰减作用,轴向上的振动速度会迅速衰减,随着爆心距增加,相同爆心距处,轴向与径向上的振动速度会逐渐接近直至相等。

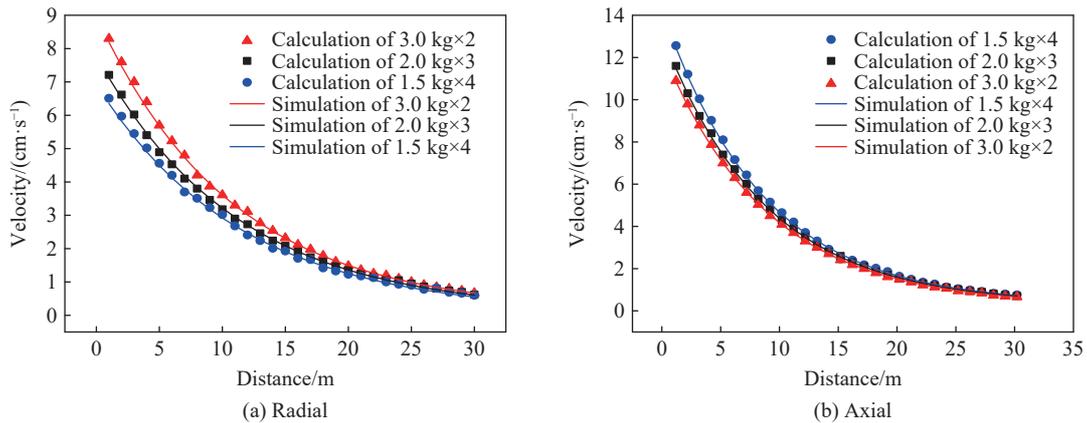


图 3 轴向分布式药包最大振动速度

Fig. 3 Maximum vibration velocity at different locations of axial distributed excitation:

### 3 轴向分布式药包激发地震波场特征实验

为了对本文模型进行验证,开展轴向分布式药包激发地震波场实验,对比实验与等效模型计算的质点振动速度之间的差距。实验在地面空旷、平整的区域开展,以减少复杂地形及构筑物对地震波数据采集工作的影响,增加实验数据的准确性。轴向分布式药包激发方案如表 1 所示。根据现场打孔取样的勘察结果,距离地面 1~5 m 为粉土,5~10 m 为粉质黏土,粉质黏土的详细参数如表 2 所示。本次测试振动速度的传感器指标如表 4 所示。

表 4 检波器部分参数

Table 4 Parameters of sensors

量程/V	灵敏度/[V·(m·s <sup>-1</sup> ) <sup>-1</sup> ]	通频带/Hz	误差范围/%
10	7	1~100	<0.05

传感器布设在地面,距离炮孔最近传感器的水平距离为 10 m,其后间隔 4 m 呈直线依次布设 6 个传感器,共布置 12 个传感器,埋深为 0.3 m,检波器布置如图 4 所示。

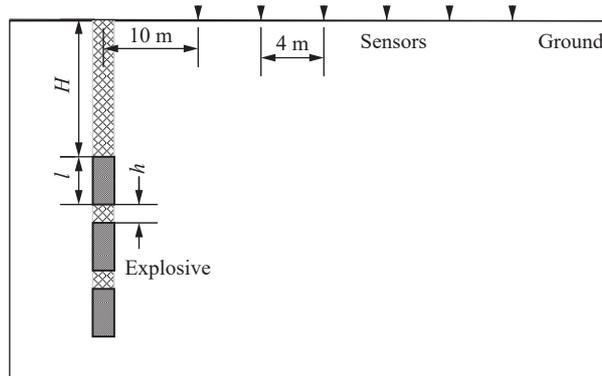


图 4 传感器布置  
Fig. 4 Sensor layout

对不同激发方案的质点振动峰值进行统计, 并与轴向分布式药包激发地震波场模型的理论计算结果进行对比, 得到不同激发方案激发时质点振动速度峰值衰减曲线, 如图 5 所示。其中实线为轴向分布式药包模型计算的理论振动速度最大值, 单点为对应位置处振动速度检波器实测质点振动速度的最大值。表 5 列出不同位置处最大振动速度误差对比结果。

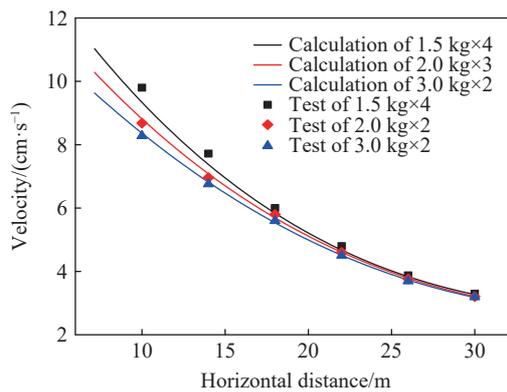


图 5 不同激发方案地震波的峰值粒子振动速度衰减规律  
Fig. 5 Peak particle vibration velocities of seismic waves with different excitation schemes

表 5 不同位置 ( $x$ ) 处峰值粒子速度实验结果相与计算结果的相对误差  
Table 5 Table 6 Relative error of experimental results of peak particle velocity to the calculational ones at different position  $x$

炸药激发方案	误差/%					
	$x=10\text{ m}$	$x=14\text{ m}$	$x=18\text{ m}$	$x=22\text{ m}$	$x=26\text{ m}$	$x=30\text{ m}$
3 kg×2	4.52	4.84	4.77	4.32	3.92	4.12
2 kg×3	4.56	4.63	4.32	3.93	4.12	3.93
1.5 kg×4	8.01	6.82	6.51	7.25	8.80	9.44

通过对比发现实验结果与等效模型计算结果在 3 kg×2 和 2 kg×3 两种激发方案中误差较小, 1.5 kg×4 的误差较大。这主要是地层分层结构造成的, 实验位置处 5~10 m 为物理参数相同的粉质黏土, 当采用 1.5 kg×4 的激发方案时, 第一段和最后一段炸药起爆的爆腔及塑性区有一部分处于其他地层中, 不同地层的岩土参数并不相同, 导致炸药形成的爆腔及地震波特性也不同, 所以计算结果与实际结果会有差异。但是完全处于粉质黏土层的 3 kg×2 和 2 kg×3 的两种激发方案中的振动速度与理论值相差在 5% 以

内, 这说明轴向分布式药包激发地震波模型可以描述工程应用中炸药地震波的特性, 符合工程应用需要。

### 4 讨 论

轴向分布式药包的几何结构决定了震源近场区域的地震波场特征在轴向与径向并不相同, 但是随着爆心距的增加, 其轴向与径向上的最大振动速度呈趋近状态。为了研究轴向分布式药包激发地震波场的发展状况, 以相同药量的球形药包激发地震波场作为参考, 求解与球形药包最大质点振动速度相等的分布式药包爆心距的轴向距离及径向距离, 求解示意图见图 6。以 3 kg×2 TNT 在土中的爆炸过程为例, 对在 50 m×50 m 范围内分布式炸药地震波轴向和径向发展过程进行分析, 结果如图 7 所示, 其中每段柱形药包长径比为 15。

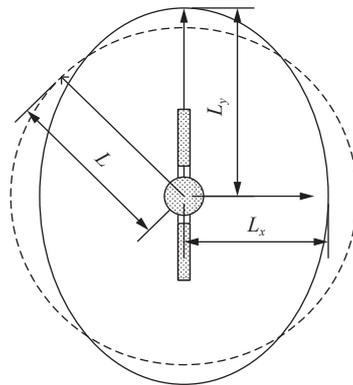


图 6 球形药包和轴向分布式药包地震波场

Fig. 6 Seismic wave field of spherical explosive and axially-distributed explosive

从图 7 可以看出, 在 10 m 范围内地震波振幅值迅速衰减, 其中轴向分布式药包在轴向分方向上的振动速度大于径向的振动速度, 主要原因是径向上不同位置药包形成的地震波会有一部分能量被抵消, 而轴向向上的各个药包形成的地震波可以无损叠加。当等效距离为 18 m 时, 轴向分布式药包激发的地震波振幅等值线在轴向距离与径向距离上的差异为 5%, 这时的等效距离为药柱长度的 9.8 倍。另外通过对比发现, 当药量相同时随着距离增加, 球形药包与分布式柱形药包在相同距离处质点最大振动相同, 可以认为在距离爆源中心一定距离处分布式柱形药包与球形药包形成的地震波最大振动速度是相同的。

同样的, 3 kg×2 轴向分布式药包与 6 kg 球形药包在相同岩土介质条件下, 频率衰减过程如图 8 所示。

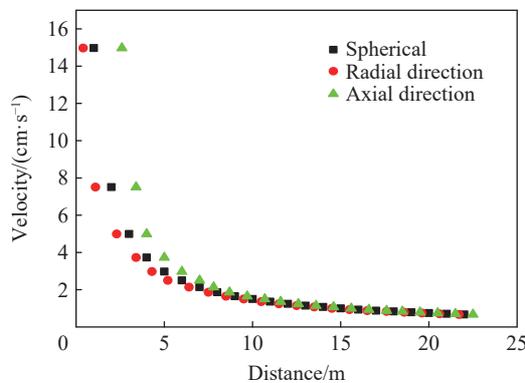


图 7 相同质点振动速度时球形药包距离与柱形药包轴向、径向距离对比

Fig. 7 Comparison of the distance between spherical explosives and different directions of axially distributed cylindrical explosives at the same particle vibration velocity

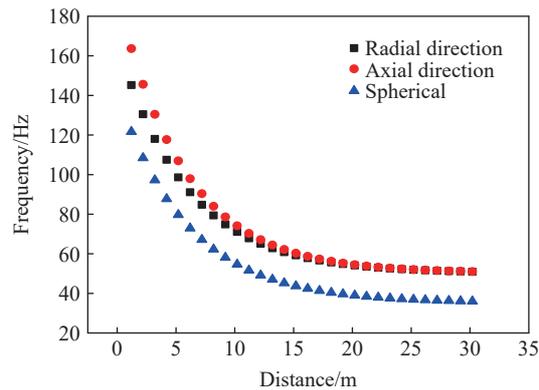


图 8 轴向分布式柱形药包和球形药包形成地震波主频对比

Fig. 8 Comparison of frequency of spherical charge and axially distributed charge

可以发现轴向分布式柱形药包产生地震波频率大于球形装药产生的频率, 因为轴向分布式药包主频与各个等效球形药包直径相关, 这些等效药包产生地震波主频大于球形药包主频。轴向分布式炸药药包激发地震波在轴向上频率大于在径向上频率, 这是由于炸药在轴向传爆需要一定时间, 地震波传播到相同爆心距时, 径向已经产生一部分衰减, 而轴向则尚未衰减, 所以两者会产生差距, 这种频率差距会随着距离增加而减小, 当爆心距到达 15 m 时两者差距为 3%, 达到一定距离后两个方向上的地震波主频相等。

## 5 结 论

为了明确柱轴向分布式药包与地震波场之间的关系, 本文以球形空腔震源模型为基础, 通过多个球形药包叠加等效替代柱形药包的方法, 提出轴向分布式药包激发地震波场的计算方法, 建立了轴向分布式药包激发地震波场模型。该模型克服了传统球形药包震源模型和柱形药包震源模型无法精确描述对地震勘探中分布式药包地震波场特性的不足, 为指导精细勘探生产需要提供理论基础。

采用数值模拟和现场实验两种方法验证了理论模型的适用性。其中, 数值模拟计算结果表明, 径向上, 理论模型与数值模型计算结果误差在 5% 以内; 轴向上, 理论模型与数值模型计算结果误差 3.4% 以内。现场实验结果表明, 爆心距大于 14 m 时理论模型地震波振动速度误差都在 10% 以内, 计算误差随着距离增加而减小, 距离大于 24 m 时误差小于 6%。对比实验结果发现, 轴向分布式药包激发地震波场模型可以对轴向分布式药包在岩土中激发的地震波场进行描述。

轴向分布式药包在岩土中激发时, 在炸药附近, 其形成的地震波场存在方向性, 即轴向与径向上的波场存在差异。在爆心距相同条件下, 轴向上振动速度大于径向上振动速度, 两者差异随着爆心距的增加而减小, 当爆心距为药柱长度的 16~21 倍时, 轴向与径向振动速度差异在 5% 以内, 此时轴向分布式药包形成的地震波场与球形药包形成地震波场在能量上基本一致, 但是轴向分布式药包形成的地震波场主频高于球形药包地震波场主频。

## 参考文献:

- [1] 陆基孟, 王永刚. 地震勘探原理 [M]. 青岛: 中国石油大学出版社, 2009: 3-5.
- [2] 钱七虎, 王明洋. 岩土中的冲击爆炸效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010: 52-57.
- [3] JEFFREYS H. On the cause of oscillatory movement in seismograms [J]. *Geophysical Journal International*, 1931, 2(S8): 407-416. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1931.tb04462.x.
- [4] SHARPE J A. The production of elastic waves by explosion pressures: I: theory and empirical field observations [J]. *Geophysics*, 1942, 7(2): 144-154. DOI: 10.1190/1.1445002.
- [5] BLAKE F G Jr. Spherical wave propagation in solid media [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1952, 24(2):

- 211–215. DOI: 10.1121/1.1906882.
- [6] 肖建华, 孙文涛. 关于点爆炸震源产生的地震子波 [J]. *石油地球物理勘探*, 1997, 32(6): 809–817. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7210.1997.06.006.  
XIAO J H, SUN W T. Seismic wavelet generated by point explosive source [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1997, 32(6): 809–817. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7210.1997.06.006.
- [7] 肖建华. 论球面波波动方程 [J]. *石油地球物理勘探*, 2001, 36(2): 160–172. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7210.2001.02.004.  
XIAO J H. Argument on wave equation of spherical wave [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2001, 36(2): 160–172. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7210.2001.02.004.
- [8] 丁桦, 郑哲敏. 爆破震动等效载荷模型 [J]. *中国科学 (E 辑)*, 2003, 33(1): 82–90. DOI: 10.3969/j.issn.1674-7259.2003.01.011.
- [9] 林大超, 白春华. 爆炸地震效应 [M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [10] YU C L, WANG Z Q, HAN W G. A prediction model for amplitude-frequency characteristics of blast-induced seismic waves [J]. *GEOPHYSICS*, 2018, 83: T159–T173. DOI: 10.1190/geo2017-0228.1.
- [11] HEELAN P A. Radiation from a cylindrical source of finite length [J]. *Geophysics*, 1953, 18(3): 685–696. DOI: 10.1190/1.1437923.
- [12] STARFIELD A M, PUGLIESE J M. Compression waves generated in rock by cylindrical explosive charges: a comparison between a computer model and field measurements [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1968, 5(1): 65–77. DOI: 10.1016/0148-9062(68)90023-5.
- [13] 龙源, 林学圣, 许连坡. 条形装药土中爆炸空腔发展过程的实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 1988, 8(3): 227–235.  
LONG Y, LIN X S, XU L P. Experimental research on growth process of the cavity of a strip-shaped explosive charge exploding in soil [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1988, 8(3): 227–235.
- [14] 李鹏毅, 王仲琦, 徐谦, 等. 有限长柱形药包土中爆腔特征尺寸的计算方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(12): 124201. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0416.  
LI P Y, WANG Z Q, XU Q, et al. Calculation methods for characteristic sizes of blasting cavities induced by finite-length cylindrical charges in soil [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(12): 124201. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0416.
- [15] 于成龙, 王仲琦. 球形装药爆腔预测的准静态模型 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 249–254. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0249-06.  
YU C L, WANG Z Q. Quasi-static model for predicting explosion cavity with spherical charges [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 249–254. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0249-06.
- [16] 胡立新, 杨德宽, 何兵寿, 等. 延迟爆炸法的理论分析 [J]. *石油地球物理勘探*, 2002, 37(1): 33–38. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7210.2002.01.007.  
HU L X, YANG D K, HE B S, et al. Theoretic analysis of delayed blast [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2002, 37(1): 33–38. DOI: 10.3321/j.issn:1000-7210.2002.01.007.
- [17] 黄文尧, 颜事龙, 吕淑然, 等. 低爆速细长震源药柱的研究与应用 [J]. *爆破器材*, 2005, 34(4): 18–22. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2005.04.007.  
HUANG W Y, YAN S L, LÜ S R, et al. The research and application of the low detonation velocity and elongated source charge [J]. *Explosive Materials*, 2005, 34(4): 18–22. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2005.04.007.
- [18] 牟杰. 炸药震源激发地震波近场特征试验研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.

(责任编辑 王小飞)