

文章编号: 1001-1455(2001)03-0237-04

岩体中非填实爆炸空腔壁振动状态分析

楼涛^{1,2}, 张海波², 肖卫国²

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 采用流体动力学模型研究了地下空腔中化学爆炸冲击波的传播过程及空腔壁的运动状态。计算中体现了空气冲击波与空腔壁作用后激发的强谐振幅高频冲击波。在实验中, 解决了空腔内传感器的防护和抗干扰等技术难题, 测到了空腔壁的地运动加速度波形。通过对所测波形的时频域分析得出了非填实爆炸在源区和近区激发高频应力波, 其频率明显高于填实爆炸的频率。这些特征与数值计算相一致。最后简略讨论了数值计算与实验测量中需解决的问题。

关键词: 岩体; 非填实爆炸; 振动; 流体动力学; 冲击波

* 中图分类号: O382 文献标识码: A

1 引言

非填实爆炸研究的目的是利用不同形状和尺度的空腔使爆炸耦合到周围介质的能量减少, 达到降低近区地运动参数值和远区地震信号幅值, 以保护工程结构并使爆炸不被他人探测到。早在 60 年代初, 美国、前苏联等国家就开始了这方面的研究工作, 至今已进行了大量的理论计算和实验室实验, 取得了一批较成熟的研究成果, 并应用于现场爆炸实验。目前这一研究工作仍在不断完善和深入。

理论分析、数值计算和实测结果都表明, 相同的爆炸当量, 一定的尺寸下, 非填实爆炸与填实爆炸相比有两个显著的特征, 即信号幅值较小和频率相对较高。为了了解、掌握非填实爆炸技术, 我们在理论和实验上研究了空腔中爆炸冲击波对岩体的作用, 证实了非填实爆炸的特征, 同时也分析了测试技术对非填实爆炸现象研究的影响。

根据国外资料介绍, 在一定埋深下硬岩介质中的空腔, 爆室壁在爆炸冲击波作用下处于完全弹性的空腔半径约为 $R_{\text{空}} = 0.30\text{m}/\text{kg}^{1/3[1]}$ 。计算和实验中所取的炸药量为 240kg TNT, 空腔半径为 1.85m, 所以爆炸后冲击波作用的爆室壁应处于完全弹性状态。

2 计算结果

2.1 计算模型

在花岗岩体中有一球形空腔, 球心处为 TNT 药球, 装药半径为 R_0 , 空腔半径为 R_{wall} , 药球与花岗岩腔壁之间为空气介质。TNT 爆炸后, 在空气中产生一个冲击波向外传播。冲击波碰到腔壁发生反射, 同时有部分能量耦合到岩石介质中, 在岩石介质中产生一个向外传播的应力波。

计算中采用流体力学模型研究爆炸冲击波的运动规律, 其中爆炸产物的状态方程采用 BKW 方程的演化形式^[2]。运用一维球对称流体——弹塑性模型对非填实爆炸的动力学过程进行模拟, 研究爆炸冲击波与空腔壁作用的反射过程、空腔壁的运动, 以及岩石介质中应力波的传播。

TNT 的爆速 D_J 选用布鲁斯顿炸药研究所的研究结果, 即: $D_J = 1785 + 3.225 \rho_0$ (ρ_0 为装药密度, kg/m^3 ; D_J 的单位为 m/s)。

描述空腔、岩石中动力学过程的拉格朗日形式的一维球对称流体——弹塑性模型的微分方程组为

* 收稿日期: 2000-05-29; 修回日期: 2001-01-31
作者简介: 楼涛(1960—), 男, 硕士, 副研究员。

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial r} = -V_0 \left(\frac{R}{r}\right)^2 \frac{\partial}{\partial r} \left(p + q + \frac{4\tau}{3}\right) - \frac{4\tau V}{R} \\ V = V_0 (R/r)^2 \frac{\partial R}{\partial t} \\ \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{\partial e_V}{\partial t} + \frac{\partial e_s}{\partial t} = - (p + q) \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{4\tau V}{3} \left(\frac{u}{R} - \frac{\partial u}{\partial R}\right) \end{cases} \quad (1)$$

状态方程为

$$e_V = e_V(p, V) \quad (2)$$

$$e_s = 2\tau^2 V / (3G) \quad (3)$$

质点速度为

$$u = R/t \quad (4)$$

人工粘性为

$$\begin{cases} q = \frac{a}{V} \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right|^2 \Delta V^2 + \frac{b}{V} \left| \frac{\partial u}{\partial r} \right| \Delta V & \frac{\partial u}{\partial r} < 0 \\ q = 0 & \frac{\partial u}{\partial r} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

最大剪应力为

$$\begin{cases} \tau = \tau_s & p \geq p_L \\ \tau = |\tau_s| \text{sign}(\bar{\tau})_s & \tau \geq \tau_s \\ \frac{\partial \tau}{\partial t} = G(u/R - \frac{\partial u}{\partial R}) & \tau < \tau_s \end{cases} \quad (6)$$

式中： R 为 Euler 坐标， r 为 Lagarange 坐标， V 和 V_0 分别为变形前后的体积， e_V 为体积形变比能， e_s 为剪切形变比能， p_L 为液化压力， τ_s 为屈服极限。

TNT 的状态方程采用 Los Alamos 的 BKW 方程，即

$$\ln p = A_1 + A_2 \ln V + A_3 (\ln V)^2 + A_4 (\ln V)^3 + A_5 (\ln V)^4 \quad (7)$$

$$\ln T = A_6 + A_7 \ln V + A_8 (\ln V)^2 + A_9 (\ln V)^3 + A_{10} (\ln V)^4 \quad (8)$$

$$\text{由 } \gamma = -\ln p / \ln V \text{ 得： } \gamma = -A_2 - 2A_3 \ln V - 3A_4 (\ln V)^2 - 4A_5 (\ln V)^3 \quad (9)$$

式中：系数 A_i ($i=1, 10$) 可查表得到， γ 为绝热指数。

花岗岩的状态方程在加载段采用 Hugoniot 曲线，在卸载段的流体区采用 Gruneisen 状态方程，固体区采用变模量卸载。

2.2 计算结果及分析

在计算过程中，总能量偏差控制在 5% 以内。TNT 爆轰产物的温度在 3097 ~ 1098K 间变化时， γ 介于 2.7 ~ 1.4 之间；温度小于 1098K 时， γ 恒取 1.4。TNT 的装药密度为 $1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ，装药质量为 240kg，球形装药半径 R_0 为 0.36m。空腔半径 R_{wall} 为 1.85m，约为装药半径的 5 倍。图 1 为计算的空腔内不同时刻的压力波形，箭头方向为冲击波传播方向。

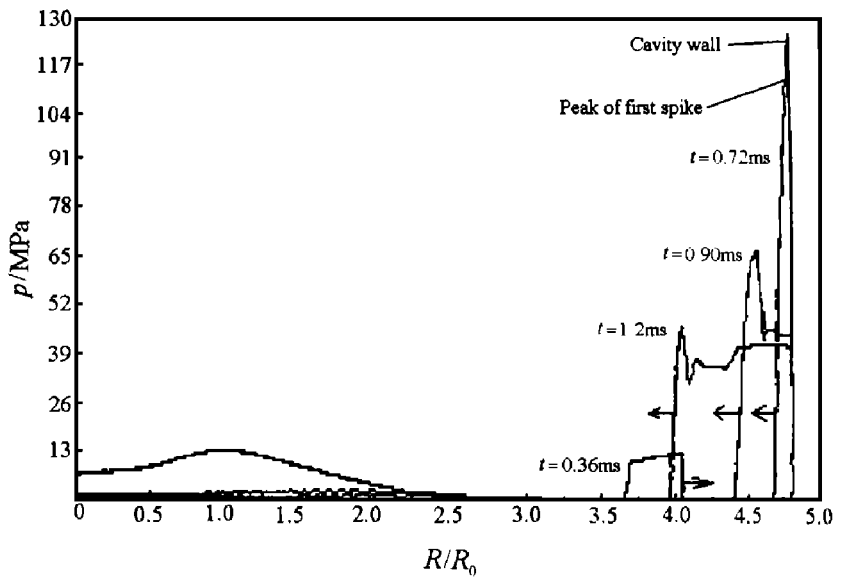


图 1 解耦爆炸空腔中不同时刻的压力波形

Fig.1 Decoupling radial pressure profiles in cavity for different times

从图 1 中可以看到，TNT 炸药爆炸冲击波在空腔壁上的反射压力约为 $5.0 \times 10^7 \text{ Pa}$ ，反射波向空腔中

心方向运动时,冲击波峰值压力衰减很快。空腔壁压力及空腔半径随时间的变化如图 2 和图 3 所示。

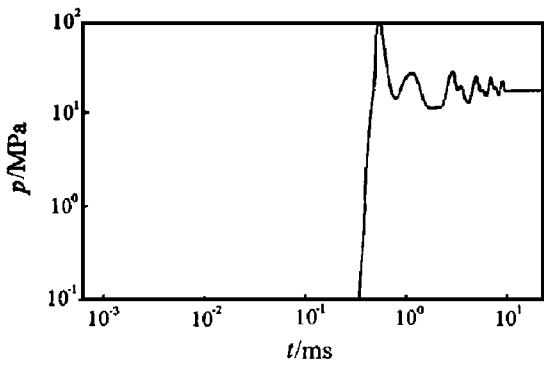


图 2 爆室壁压力与时间的关系

Fig.2 The relation between the pressures and time on the cavity-wall

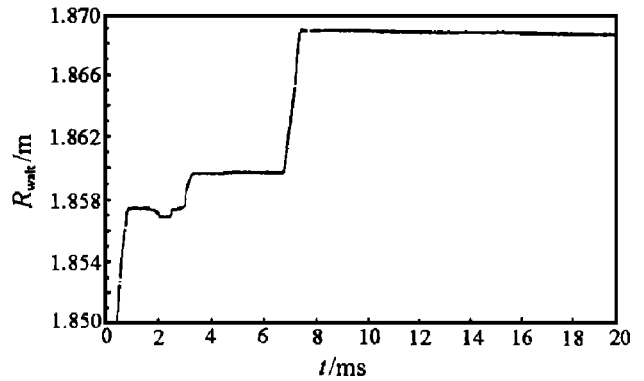


图 3 空腔半径与时间的关系

Fig.3 The relation between the radius of cavity and time

从图 3 可以看出,解耦爆炸引起的空腔半径变化在 0~20mm 之间,随着空气冲击波的减弱,空腔壁回至原来状态。空气冲击波在空腔壁面的反射激发高频震荡,频率在几千赫兹左右,这与填实爆炸的应力波具有本质区别。

3 测试系统及测量结果

3.1 测试系统

非填实爆炸实验在硬岩场地下进行,埋深约为 15m,空腔类似球腔^[3]。离爆心一定距离处安放测量爆炸参数的装置。

实验中安排的测量项目主要以测量加速度参数为主。地运动加速度 a 测点分布在空腔壁上及地表面等不同爆心距处,各测计与基岩相固连。考虑到空腔爆炸激发高频力学信号的特点,在不同距离上安放了不同频响的加速度测计。在爆室壁上,加速度测计的频响 f 的范围为 1~20kHz,量程为 5km/s^2 ,其它测点的测计频响范围、量程各不相同。

3.2 测量结果

图 4 和图 5 分别为在爆室壁处测到的加速度波形和与其相对应的频谱图。从图中可以看出,空腔壁处的高频是很丰富的,甚至超过了测计频响的线性响应范围(20kHz),所以超过 20kHz 的谱振幅是不真实的。实验中还安排测量了实验场地附近的地运动加速度,测试结果的一致性很好^[4]。结合分析其

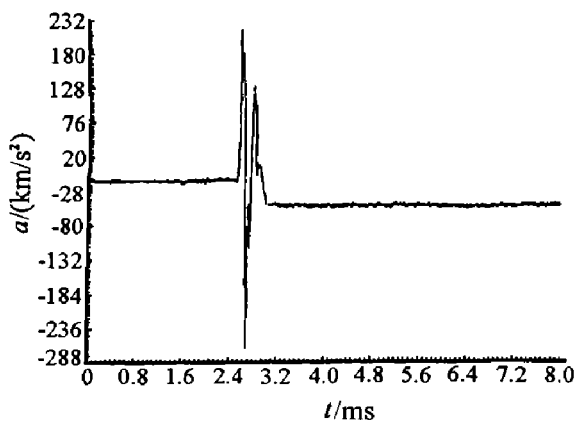


图 4 爆室壁处的加速度波形

Fig.4 The acceleration waveform in the cavity wall



图 5 对应于图 4 的频谱图

Fig.5 The spectrum chart for Fig.4

它测点的谱振幅,对于非填实爆炸,有以下两点看法^[3,4]:(1) 高频分量(十几千赫兹以上)在近区是很丰富的,且衰减较慢,这与填实爆炸有本质的区别;(2) 目前的加速度传感器不能满足测量的要求。需研制小信号、高频响的力学类传感器。实验测量和数值计算结果符合较好,都体现了非填实爆炸激发丰富的高频冲击波和应力波,这与国外文献报道的一致。实测波形的分析还发现,由于高频应力波的谱振幅较强而体现为衰减较慢,在较远的距离上还能检测到较高频率的应力波或地震波。这也是非填实爆炸现象的重要特征之一。实验结果也证明了计算中所选用的物理模型基本上是合适的,计算结果基本上描述了空腔壁的物理、力学过程。由于实验数据的不足,还不能对数值计算模型的改进和完善起到较大的作用。

在非填实爆炸的动态力学量的检测中,由于高频力学信号随爆心距衰减很快,所以广大区域里所要检测的信号往往是幅值小、频率高,用现有的传感器要完全记录波形的真实信息是很困难的。也可以说,实验中测到的信号可能是失真的。这对实测波形的分析和计算模型的建立带来了较大困难。为了在更深层次上理解非填料爆炸力学现象,实验中越来越需要高灵敏度、高频响的力学类传感器,这对传感器的研制提出了新的课题。就目前的情况来说,缺乏此类传感器的确制约了非填实爆炸力学现象研究的深入。

参考文献:

- [1] WILKINS M L. The Calculation of Elasto-plastic Flow [R]. UCRL-7322.
- [2] PATTERSON D W. Nuclear Decoupling Full and Partial [J]. Journal of Geophysical Research, 1966, 71 (14): 3427—3436.
- [3] 楼涛,王征,张海波,等. 小型解耦化爆爆炸波特性分析 [J]. 爆炸与冲击, 1997, 17 增刊: 113—120.
- [4] 楼涛,李世维,肖卫国,等. 某次非填实地下化爆地运动参数特性分析 [J]. 爆炸与冲击, 1999, 19 增刊: 201—204.

Study on Vibration Behaviors of Rock-wall in Decoupling Explosion

LOU Wei-tao^{1,2}, ZHANG Hai-bo², XIAO Wei-guo²

(1. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

Abstract: Vibration behavior of the rock-wall in chemical decoupling explosion was studied by using the model of hydro-dynamics in this paper. High frequency with strong level induced by interacting shock wave to cavity wall was expressed in calculation. Stress waves with high-frequency in near field in decoupling explosion were obtained from FFT to accelerations waveform measured in experiment, and the frequency of stress wave was high than that in coupling explosion obviously. The results in experiment were agreed with those in calculation. Finally, some problems that existed in calculating and measuring were discussed preliminarily.

Key words: rock; decoupling explosion; vibration; hydrodynamics; shock wave