

# 基于有限元数值计算的爆破震动强度分析

刘红岩<sup>1</sup>, 刘国振<sup>2</sup>, 杨 军<sup>2</sup>, 陈鹏万<sup>2</sup>

(1. 中国科学院工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 2. 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:** 爆破震动强度的预测一直是爆破震动危害控制的前提和基础, 也是其研究的一个重要课题。基于有限元数值模拟方法的基础上对反映爆破震动强度的重要指标——质点振动速度的计算方法进行了探讨, 并对空气和水两种不同间隔装药结构下的震动强度计算结果进行了对比分析。数值模拟结果表明, 在爆心距不太大的情况下, 计算结果与实测结果吻合较好, 研究结果对爆破设计与施工有一定的指导意义。

**关 键 词:** 数值模拟; 震动强度; 预测; 间隔装药

**中图分类号:** O 242.21, O 38      **文献标识码:** A

## Analysis of blasting vibration intensity based on finite element numerical calculation

LIU Hong-yan<sup>1</sup>, LIU Guo-zhen<sup>2</sup>, YANG Jun<sup>2</sup>, CHEN Peng-wan<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. State Key Laboratory of Blasting Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Forecasting of the blasting vibration is always the premise and basis of the controlling of the blasting vibration damage, and is an important subject of it. Based on the numerical simulation method of finite element, the calculation method of particle vibration velocity, an important index reflecting the blasting vibration intensity, is discussed; and an comparison analysis of the calculation results between two different kinds of charge structures decked with air and water is made. Numerical simulation results indicate that the calculation results are correspondent with the actual results if the distance from the blasting center is not far; it has certain significance to the design and construction of blasting.

**Key words:** numerical simulation; vibration intensity; forecasting; decked charge

## 1 引 言

在爆破工程尤其是大型的岩土爆破工程施工中, 爆破震动的预防与控制爆破施工与设计占有至关重要的作用, 特别是在爆破环境比较复杂的情况下, 爆破震动的控制显得尤为重要。在目前的爆破震动控制中, 最常用的方法是在已测试出的爆破震动数据基础上, 根据萨道夫斯基公式或模糊控制理论如神经网络技术等<sup>[1~3]</sup>, 得到爆破震动的传播规律, 进而可以对以后的爆破工程起到很好地指导作用。这种方法在爆破震动的预测及控制中起到了非常重要的作用, 但是这种方法也有一个明显的缺点就是必须要有大量的震动测试数值为基础, 而在震动测试数据的获得并不是很容易的情况下, 这种方法就显得无能为力了, 所以很有必要寻找一种在事先没有震动测试数据的基础上, 能够对爆破震

动强度进行预测的方法, 进而对爆破设计与施工起到指导作用。

本文即提出一种采用数值模拟技术对爆破震动强度进行估计的方法, 这种方法不需要事先进行大量的爆破震动数值测试, 在仅知道岩石参数和装药参数的条件下即可对一定爆破规模下某一特定距离处的爆破震动强度进行估计。在本文中, 主要对两种不同间隔装药条件下的爆破震动强度进行了数值计算, 并与相应的试验结果进行了对比分析。

## 2 爆破近区数值计算

当炸药在岩石中爆炸后, 根据距炮孔中心的远近不同, 可把整个岩石区域分为粉碎区、裂隙区和震动区。而岩石根据在各个区域中的受力不同也表现出流体性、弹塑性和弹性等不同的力学特性。而通常需要保护的被保护物距爆源都不是特别近, 也

就是说大多处于岩石的弹性震动区,所以这样一来数值模拟的区域必须要跨越几个不同的区域,因此,在数值计算中要采用同一种岩石模型是不太合适的,因而在本文中,数值计算分两步进行:首先在爆源近区,采用 ALE 算法处理近区塑性大变形问题;其次,提取爆炸弹性空腔半径上的压力数据,然后在远区做振动模拟,以获得分析数据。因而进行近区爆炸地震波模拟分析的主要目的,是提取弹性空腔半径上的压力参数,为下步远场地震波的模拟做好数据准备。

## 2.1 计算模型

本文采用 2 号岩石炸药对水与空气两种不同的间隔装药结构进行模拟。计算域中包含 4 种物质:2 号岩石炸药、岩石、空气、水。通过 ANSYS 前处理程序生成三维有限元网格模型,3 种物质均用 SOLI164 实体单元进行单元划分。用 ALE 算法进行计算。为了节省机时,便于计算,由于模型轴对称,取模型的 1/4 进行研究。模型长 500 cm,宽 200 cm,高 1 400 cm。由于装药直径较小,而所关心的爆破作用范围较大,因此,采用变步长方式进行网格划分。XOZ 面和 YOZ 面处理成轴对称面,垂直 Z 轴 14 m,即 Z 轴方向上端面处理成自由面,其余作无反射处理。整个模型共划分 103 334 个节点,93 972 个单元。

## 2.2 材料模型与状态方程

### (1) 材料模型

LS-DYNA3D 中有许多材料模型可用于岩石模型,如几何帽子模型、伪张量材料模型、Drucker-Prager 模型、弹塑性流体模型等。本文采用 Drucker-Prager 材料模型,根据试验测定结果取岩石力学参数为: $E=48 \text{ GPa}$ , $\rho=2.878 \text{ g/m}^3$ , $\mu=0.23$ ,内摩擦角 $\phi=45^\circ$ ,内聚力 $c=20 \text{ MPa}$ 。

2 号岩石炸药采用高能炸药燃烧模型,可以被看作是一种完全弹塑性材料,该材料模型特点是允许模拟高能炸药的起爆和爆轰过程。取炸药参数为: $\rho=1.0 \text{ kg/m}^3$ ,爆速 $V=3 600 \text{ m/s}$ ,爆压 $P_{c-j}=3.24 \text{ GPa}$ 。

### (2) 状态方程

由于在爆炸场的数值模拟中,炸药的爆轰产物的压力波动范围很大,从几十万个大气压到低于一个大气压,很难找到一个适合所有范围的状态方程。JWL 状态方程能精确描述凝聚炸药圆桶实验过程,且具有明确的物理意义,因而在爆炸数值模拟中得到了广泛应用。对高能炸药的爆轰产物采用 JWL 状态方程<sup>[4]</sup>,其一般形式为:

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (1)$$

式中  $A, B, R_1, R_2, \omega$  为炸药特性参数; $P$  为压力; $V$  分别表示爆轰产物的内能和相对体积。对于 2 号岩石炸药爆轰产物,取  $A=214 \text{ GPa}$ , $B=0.182 \text{ GPa}$ , $R_1=4.15$ , $R_2=0.95$ , $\omega=0.3$ 。

对于空气,近似采用理想气体状态方程。

## 2.3 计算结果

从计算结果可以看出,空气间隔有一个比较明显的膨胀和衰减过程,水间隔却比较缓慢;同时,在两种情况下,岩石均受到强烈的冲击压缩,并以球对称形式向外扩展。

考察空气和水间隔距爆心由近及远单元的应力变化情况,可知在同等距离处水间隔产生的应力值比空气间隔大;同时随比例距离的增大,二者的峰值应力均按幂指数规律逐渐衰减。

## 3 爆破远区地震波模拟及结果分析

### 3.1 数值计算模型

模型长 200 m,宽 4 m,高 14 m,为了节省机时,取 1/2 模型进行研究。计算域包含一种物质:岩石。共划分 46 900 个节点,38 448 个单元。YOZ 面加冲击载荷,其余除平行于 XOY 面,即 Z 轴上端面为自由面外,其余为非反射。

### 3.2 材料模型

由于是考察的远端地震波传播特性,属于弹性范围,因而岩石材料模型采用弹性材料模型,取暗色辉长岩,参数如下: $\rho=2.878 \text{ g/m}^3$ , $E=48 \text{ GPa}$ , $\mu=0.23$ 。

### 3.3 加载曲线

本步是爆破震动速度计算的核心部分,前步的计算只是为该步计算提供计算压力参数。关于压力的施加主要有两个方面的问题:一是提取压力的位置,根据本文的计算目的和本步的计算模型,压力应施加在爆破后岩石的弹塑性分界面上,根据文献<sup>[5]</sup>可知,在本文中取 $k=4$ ,炸药量 $Q=176 \text{ kg}$ ,可得岩石的弹塑性分界面距炮孔中心的距离为 2.24 m。即需要在距炮孔中心 2.24 m 处提取压力曲线,作为本步中计算的初始输入压力;二是沿 Z 轴方向上压力提取的位置,由于在本文中炮孔很深,所以在同一 X 轴的截面上,其压力曲线也不尽相同,所以为了更好地反映真实情况,将加载面沿 Z 轴均匀分割成两部分,每一部分提取相应的压力曲线,作为此面上的受冲击应力。按照上述方法提取压力参数,典型的压力曲线如图 1 所示。

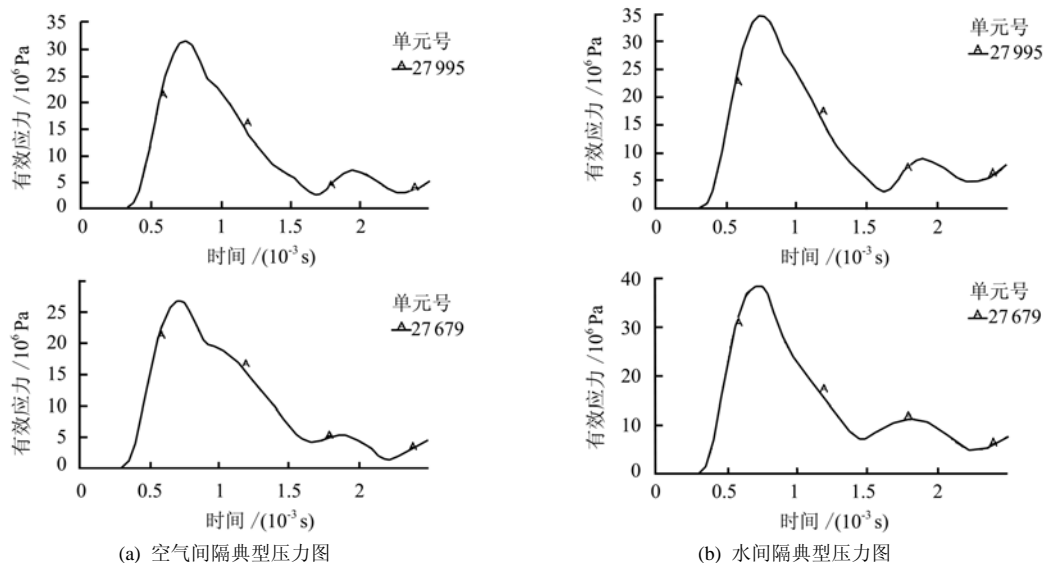


图 1 压力曲线提取结果图  
Fig.1 Result of pressure curves

### 3.4 计算结果与实验对比分析

根据以上的计算模型及参数，对距爆破中心不

同距离的自由面处提取质点垂直震动速度，典型震速图如图 2 所示。

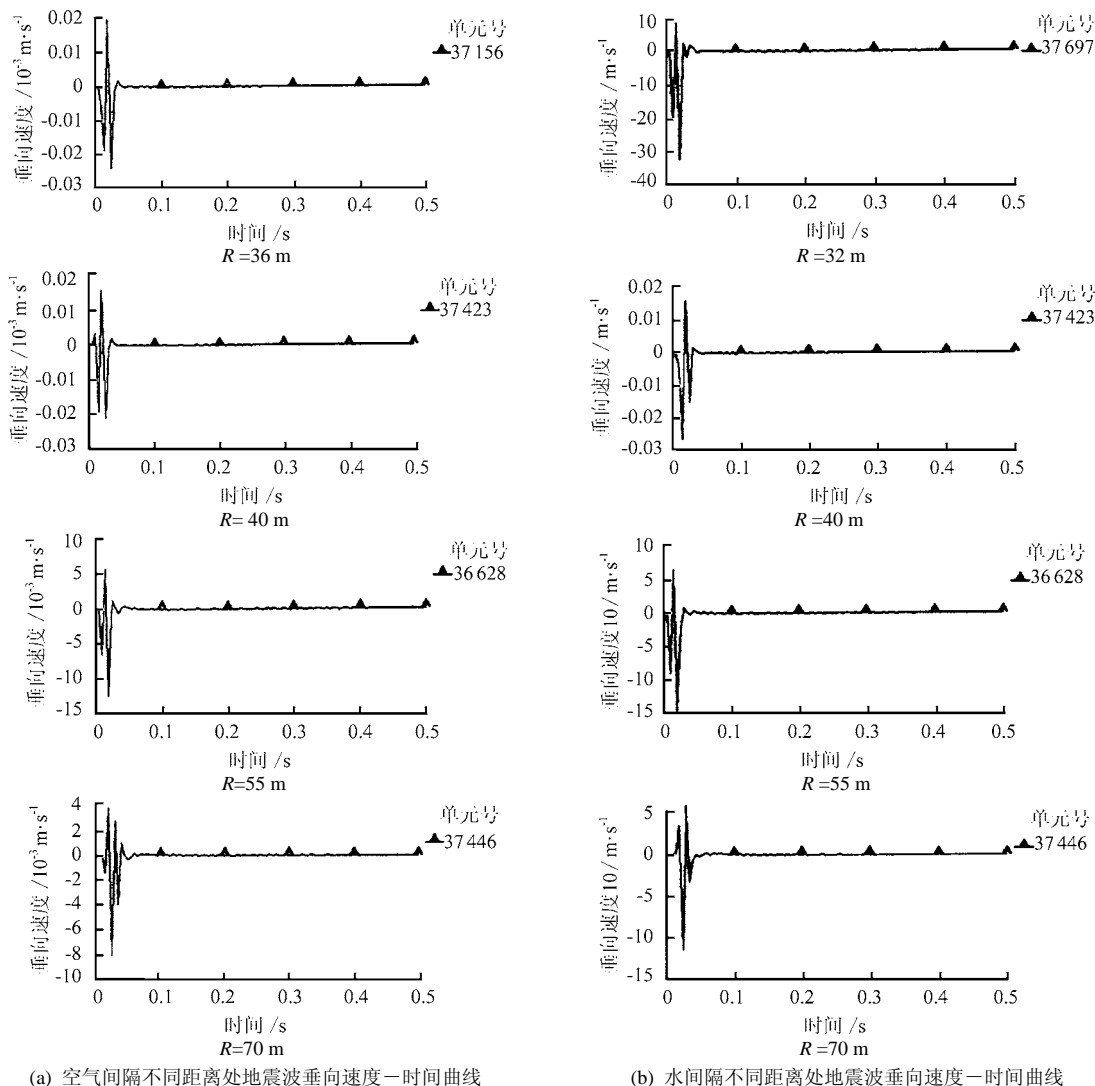


图 2 两种情况下不同距离处地震波垂直速度—时间图

Fig.2 Vertical velocity-time curves of seismic wave at different distances under two conditions

然后提取两个模拟结果中的不同质点处的峰值速度，并与试验结果进行对比，列于表 1。

**表 1 两种情况下数值模拟结果与实测结果对比**  
**Table 1 Results comparison between numerical simulation and testing**

测点	水间隔装药			空气间隔装药		
	爆心距 /m	计算振速 /cm·s <sup>-1</sup>	实测振速 /cm·s <sup>-1</sup>	爆心距 /m	计算振速 /cm·s <sup>-1</sup>	实测振速 /cm·s <sup>-1</sup>
1	36	3.22	2.87	32	2.45	2.41
2	40	2.70	2.69	36	2.30	2.33
3	44	2.62	2.50	40	2.10	2.19
4	59	1.48	2.40	55	1.25	1.82
5	74	1.20	1.80	70	0.81	1.41
6	89	0.80	1.20	85	0.72	0.92
7	104	0.65	0.94	100	0.60	0.70

由表 1 可以看出，在近距离处，计算结果和实测结果比较接近，不过随着距离的增加，二者的误差有增大的趋势。出现这种差异的原因除了试验测试系统本身的误差之外，主要可能是数值计算中材料模型和材料参数的选取与实际情况有一定的差距，如在计算中把岩石当作均质的弹性体，而在实际情况中岩石地质结构千变万化，并且地形上有高低起伏，而这些情况在数值计算中都无法完全考虑，所以导致二者结果不一也在所难免。但是，由数值模拟结果可以看出，在总体趋势上，模拟的结果还是比较合理的，也就是说通过数值模拟可以得到一个总体的震动强度变化规律。

#### 4 结 语

通过本文中的数值模拟结果可以看出，数值模拟方法在爆破震动强度预测中是可行而且非常有效的，特别是其在不需要依赖以往震动测试数据的基础上就可以对爆破震动强度作出一个比较切合实际的估计结果，这一点对爆破设计和施工是非常有指导意义的，同时这也是对现有爆破震动强度预测方法的一个有益的补充，也为该课题的研究提供了一条新的途径。

#### 参 考 文 献

- [1] 吴立, 饶杨安, 黄常波. 爆破振动分析预测与控制方法综述[J]. 水文地质工程地质, 2004, 2004(增刊): 136—140.  
WU Li, RAO Yang-an, HUANG Chang-bo. Overview of analysis forecasting and controlling method of blasting vibration[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2004, 2004(Supp.): 136—140.
- [2] 陈德志, 朱瑞赓, 徐顺香. 基于 BP 神经网络的路堑爆破对邻近民房安全预测研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(S2): 2 554—2 557.  
CHEN De-zhi, ZHU Rui-geng, XU Shun-xiang. Forecasting study on influence of roadbed blasting on neighboring house based on BP neural network[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(S2): 2 554—2 557.
- [3] 徐全军, 刘强, 聂渝军, 等. 爆破地震峰值预报神经网络研究[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(2): 133—138.  
XU Quan-jun, LIU Qiang, NIE Yu-jun, et al. Study of neural network prediction on peak particle amplitude of blasting ground vibration[J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(2): 133—138.
- [4] 王仲琦, 张奇, 白春华. 孔深影响爆炸应力波特性的数值分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 550—553.  
WANG Zhong-qi, ZHANG Qi, BAI Chun-hua. Numerical simulation of influence of hole depth on explosion effect[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(4): 550—553.
- [5] 龙源, 冯长根, 徐全军, 等. 爆破地震波在岩石介质中传播特性与数值计算研究[J]. 工程爆破, 2000, 6(3): 1—7.  
LONG Yuan, FENG Chang-gen, XU Quan-jun, et al. Study on propagation characteristics of blasting seismic waves in a rock medium and numerical calculation[J]. *Engineering Blasting*, 2000, 6(3): 1—7.