

# 沟槽深孔微差爆破的 工程实践和数值模拟<sup>\*</sup>

高文学<sup>a</sup> 金乾坤<sup>a</sup> 杨 军<sup>a</sup> 黄风雷<sup>a</sup> 段卫东<sup>b</sup> 钟冬望<sup>b</sup>

(a. 北京理工大学 北京 100081)

(b. 武汉冶金科技大学 武汉 430081)

**摘要** 以工程实践和动力有限元程序分析沟槽深孔微差爆破问题。探讨了沟槽内岩块的运动规律,以及深孔微差爆破的作用机理。结果表明,基于工程实践的数值模拟,能较客观地反映爆破破岩的动态过程,并为爆破设计提供理论依据。

**关键词** 沟槽 深孔 微差爆破 数值模拟

**中图法分类号** TD235.33

## 1 引 言

沟槽爆破作为现代爆破工程中的重要组成部分,已广泛运用于公路和铁路的路堑开挖、水电设施的基础建设以及高耸建筑物的地基处理等。

沟槽爆破是台阶爆破的一种形式,但它有着不同于一般台阶爆破的特征:(1)沟槽狭窄,岩石所受到的夹制作用大,需较大的炸药单耗和钻孔比;(2)爆区范围长,地质条件变化大,必须不断调整爆破参数;(3)爆区周围常常有重要的设施需要保护,爆破飞石及震动必须严格控制,同时受爆介质要充分破碎或解体;(4)沟槽开挖断面小,爆破一般仅有向上的临空面,为取得理想的爆破效果,常采用微差控制爆破技术,即利用先爆孔的“掏槽”作用,为后续炮孔的爆破创造自由面及岩石碎胀空间,然后依次微差起爆后续炮孔。

我们针对某一高速公路桥基基础的沟槽爆破实践,采用动态非线性三维有限元程序 LS-DYNA3D 对沟槽爆破进行了数值模拟,探讨了深孔微差爆破破岩的物理过程。通过现场爆破与室内模拟的有机结合,调整爆破参数,取得了较理想的爆破效果。

## 2 桥基沟槽微差爆破

京沪高速公路某一桥基基础,爆破部分长 40m、宽 8m、深 5~6m,介质为石灰岩,表层节理裂隙较为发育,下层则为较完整的岩体。石灰岩容重  $\rho_r$  为 2500~3100kg/m<sup>3</sup>,极限抗压强度为 100~150MPa,弹性模量  $E$  为 40~50GPa,泊松比  $\nu$  为 0.26。桥基两侧 20m 为居民区。爆破必须保证周边设施及住宅的安全,同时必须一次爆破达到设计要求。

### 2.1 爆破参数设计

沟槽爆破设计,首先根据沟槽宽度确定布孔排距  $b$ 。由于爆区宽度有限, $b$  的选择范围较

\* 高文学:男,1962年11月生,博士研究生。

1998-08-13 收到原稿,1998-12-08 收到修改稿。

小,沿沟槽断面共布置4排炮孔, $b$ 为2.2~2.4m;孔距 $a$ 为2.5~2.8m;孔径 $\phi$ 为100mm;炮孔堵塞长度 $L_1$ 为 $16\phi \sim 32\phi$ 。炮孔装药量由下式计算

$$Q = kqabh \quad (1)$$

式中: $k$ 为与岩性、槽区夹制作用、炸药性能等有关的系数; $q$ 为炸药单耗,如采用乳化炸药, $\rho_e = 950 \sim 1000 \text{kg/m}^3$ ,爆速 $D = 3800 \sim 4100 \text{m/s}$ ,则根据试爆, $q$ 取 $0.5 \sim 0.7 \text{kg/m}^3$ ;  $a$ 、 $b$ 为孔网参数; $h$ 为孔深。

## 2.2 微差时间的选取

沟槽爆破,先爆孔能否为后续炮孔创造自由面及岩石碎胀空间,是确定爆破成功与否的关键。欲达到预期的爆破效果,微差时间的设计,必须使槽区介质破碎并部分离开原岩,形成或趋于形成鼓包运动时,后续炮孔起爆。以产生新的自由面为出发点的原则确定微差时间 $t_d$ ,则有如下经验公式<sup>[1]</sup>

$$t_d = (k_1 + k_2)Q^{1/3} + s/v \quad (2)$$

式中: $k_1$ 为系数, $k_1 = 1.2 \sim 2.0$ ;  $k_2 = 9(\alpha - 0.18)$ ,  $\alpha$ 为炸药与岩石的波阻抗比值; $s$ 为爆区岩块与原岩脱离距离, $s = 100 \text{mm}$ ;  $v$ 为岩块移动平均速度, $v = 2 \sim 5 \text{m/s}$ 。根据上式计算,兼顾沟槽爆破岩石夹制作用的影响和微差雷管段别的限制,取微差时间为 $25 \sim 50 \text{ms}$ 。

采用以上的爆破设计,从爆后效果看,爆堆集中,桥基岩石由两侧向中间隆起,形成清晰的沟槽轮廓,岩石块度均匀,一次开挖达到设计要求;同时,爆区周围及设施均未受损坏。

## 3 数值模拟

### 3.1 控制方程及本构模型

现场爆破结果为数值模拟提供了破坏模式和爆破参数,从而可以通过数值分析模拟这一动力学过程,研究岩石破碎的力学机理。这里用DYNA3D非线性动力程序进行有限元分析<sup>[2]</sup>,采用拉格朗日描述,由伽辽金法弱形式的平衡方程,应用散度定理,可得虚功原理的变分形式

$$\int_V \rho \ddot{x}_i \delta x_i dV + \int_V \sigma_{ij} \delta x_{i,j} dV - \int_V f_i \delta x_i dV - \int_S t_i \delta x_i dS = 0 \quad (3)$$

式中: $\sigma_{ij}$ 为柯西应力, $f_i$ 为单位质量的体积力, $x_i$ 为质点坐标, $t_i$ 为面力载荷。计算采用单点高斯积分,在动力分析增量解法中,每一时步都跟踪修改各节点的坐标值,并满足非线性方程组

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{p}(\mathbf{x}, t) - \mathbf{F}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{H} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{M}$ 为总体质量矩阵, $\mathbf{x}(t)$ 为节点加速度矢量, $\mathbf{p}$ 为总体载荷矢量, $\mathbf{F}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}})$ 由单元等效节点力矢量(或称应力散度)组集而成, $\mathbf{H}$ 为总体沙漏粘性阻力(控制零能模态,以避免沙漏模态的丢失和计算时出现数值振荡)。

采用人工粘性消除冲击波间断

$$a = \begin{cases} \rho l |\epsilon_{kk}| (Q_1 l |\epsilon_{kk}| + Q_2 c) & \epsilon_{kk} < 0 \\ 0 & \epsilon_{kk} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $l$ 为单元体积的立方根, $c$ 为材料声速,无量纲常数 $Q_1 = 1.5$ , $Q_2 = 0.06$ 。根据稳定性条件确定时间步长。

一般情况下,岩石可作为脆性材料来处理,这里假定岩石为均质各向同性的脆性体,并采用含断裂的弹塑性模型来描述脆性岩石本构行为:当最大主应力超过岩石断裂强度时,单元在垂直于最大主应力的平面上失效;单元处于拉伸状态时,在断裂面上不能传递应力,但在压缩时可传递正应力和剪应力;如果另一方向的主应力也超过了岩石的断裂强度,则单元丧失承载能力,材料性质如同流体。

对于微差爆破,计算时间较长。为减少机时,同时兼顾爆破设计,作如下处理:

(1)由于爆区纵向较长,炮孔布置规则,计算时将三维模型简化为二维平面应变模型,沿 $z$ 方向取一层单元计算;

(2)采用作用于孔壁的压力脉冲来模拟柱状药包的爆炸效应,孔壁压力采用阻抗匹配法计算;

(3)采用 Grüneisen 状态方程描述高压下压力和比容的关系;

(4)排间微差时间取 25ms 或 50ms,即中间“掏槽”炮孔起爆 25ms 或 50ms 后,两侧炮孔起爆;

(5)由于对称性,取一半网格计算,底部边界( $y = -10\text{m}$ )和右边界( $x = 15\text{m}$ )设为非反射边界,以消除反射效应的影响,如图 1。

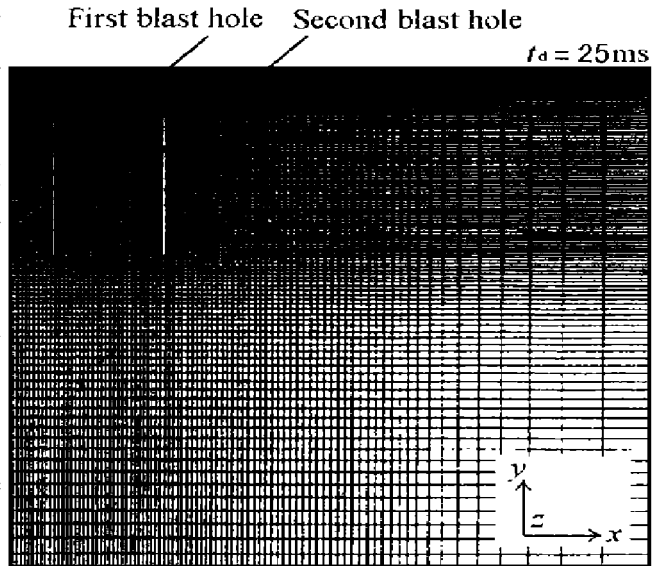


图 1 网格划分示意图(一半网格)

Fig.1 Schematic diagram of the mesh (half of cell)

### 3.2 数值模拟结果及分析

根据爆破设计及本构模型,我们对不同爆破参数下沟槽爆破破岩的物理过程进行了模拟与比较。

#### 3.2.1 破岩物理过程

图 2 为 4 个典型时刻的最大主应力分布图,由图可见:当  $t = 3.3\text{ms}$  时,先爆孔内的岩石已破坏。根据最大主应力分布,孔底部分岩石受压,由于强烈的冲击压缩作用,逐渐丧失抗剪能力,最终类似流体,这部分岩石向自由面方面移动;而孔口部分的岩石,由于受到反射应力波的作用,主要表现为拉伸破坏,层裂现象明显。当  $t = 10\text{ms}$  时,炮孔两侧岩体自上而下受到不同程度的破坏,上部因受反射拉伸波的影响,层状裂纹分布  $\beta$ (裂纹面与水平面的夹角)变化在  $0^\circ \sim 45^\circ$  范围,这符合一般破裂规律;孔口(装药端部)附近,裂纹发育;自由面层裂大块由于受到腔内运动岩块的挤压,向外移动,并逐渐加剧;沟槽下部,岩体由于受夹制作用,破坏发展受到限制。当  $t = 20 \sim 23\text{ms}$  时,岩体中最大主应力逐渐下降,而自由面鼓包进一步发展。当  $t = 26.5 \sim 29.99\text{ms}$  时,周边孔起爆,岩石向槽区内运动,并与槽区内的岩块发生挤压,使岩石进一步破碎。当  $t = 49.99\text{ms}$  时,沟槽已基本形成,鼓包运动发展达到最大,由于采用微差起爆,岩石向槽腔内运动,沟槽两侧岩体仅受到轻微的破坏,从而有利于边帮的稳定,这与现场开挖情况相符。从最大主应力分布来看,运动的岩块储存有一定的应变能,随着这部分能量的释放,岩块在运动中得到进一步破碎。此外,从图中可以看出,两侧炮孔微差起爆时,自由面的剥离岩块部分飞散,部分呈回落趋势,这部分岩块与沟槽内向外移动的岩石碰撞,从而进一步加剧了岩块的破碎;微差起爆时,槽腔内的岩块破碎亦呈现这一趋势。这表明微差时间较为合理。

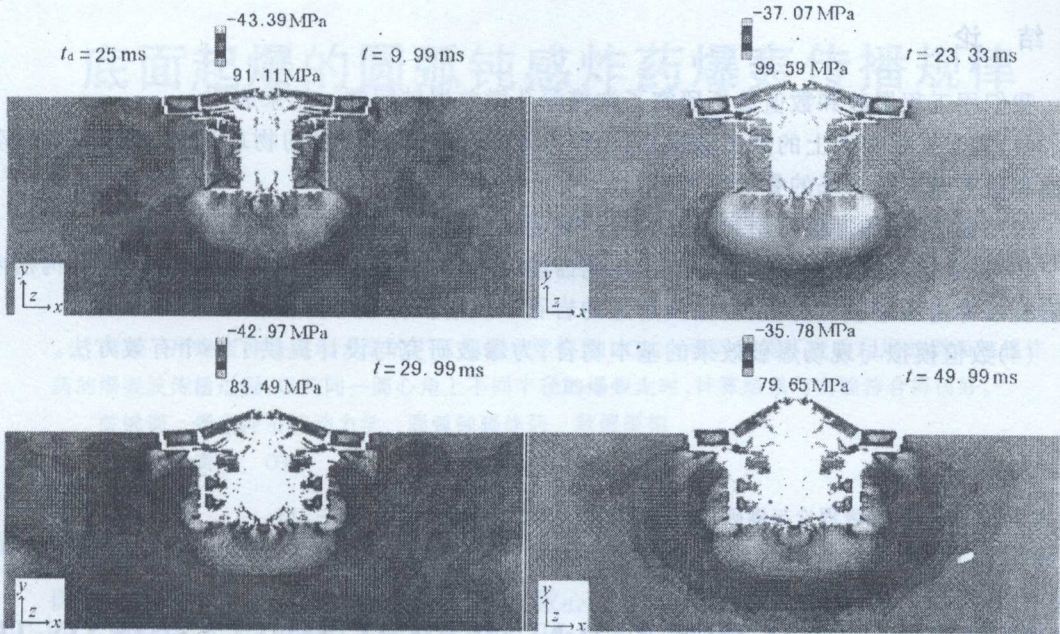


图2 最大主应力分布

Fig.2 Distribution of the largest main stress

3.2.2 历程分析

图3是单元4674及6230的 Von-Mises 等效应力历程图,其中 A 表示单元 4674(离炮孔中心 6.34m,自由面下 3.84m),B 表示单元 6230(自由面上,离炮孔中心 8.5m)。图4为  $y$  方向的速度历程图。从图3和图4可以看出:掏槽孔起爆时,等效应力和速度形成第一个峰值;当  $t = 25\text{ms}$  后两侧炮孔起爆,出现第二个峰值。对于单元 A,由于靠近炮孔下部,第二个应力及速度峰值高出第一个峰值很多;而对于位于自由面上的单元 B,第二个峰值略高于第一峰值。这表明,不同部位应力场叠加效应不同。同时,由于采用了微差起爆,地表的质点振动速度得到有效控制,从而利于边坡稳定及爆区周围设施安全。这与现场爆破结果吻合。

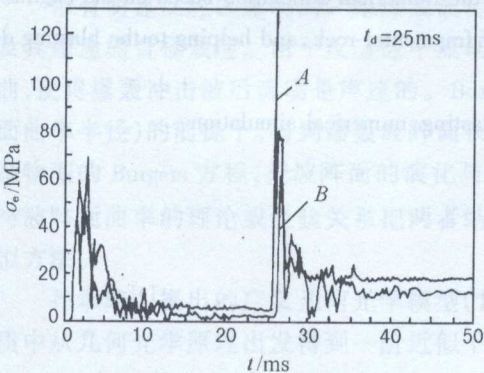


图3 Von-Mises 等效应力历程

Fig.3 Von-Mises equifinal stress

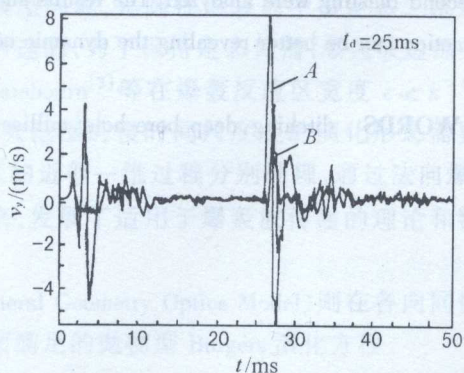


图4  $y$  方向速度历程

Fig.4 The Velocity in  $y$  dicretion

## 4 结 论

我们用工程爆破和数值分析研究了沟槽深孔微差爆破问题。结果表明:

- (1) 基于工程实践上的数值模拟, 能比较客观地反映爆破破岩的物理过程, 模拟鼓包运动规律和微差爆破应力场的叠加作用;
- (2) “掏槽”孔的爆破作用和微差时间的确定是影响爆破效果的重要因素;
- (3) 采用含断裂的弹塑性模型能较好地描述微差爆破作用下脆性岩石的本构行为: 沟槽内的岩石以冲击压缩破坏为主, 自由面附近的岩石以反射拉伸破坏为主;
- (4) 数值模拟与现场爆破效果的基本吻合, 为爆破研究与设计提供了一个有效方法。

## 参 考 文 献

- 1 高金石, 张 奇. 爆破理论与爆破优化. 西安: 西安地图出版社, 1993. 201 ~ 213
- 2 蒋维城, 丁刚毅. ANSYS/LS-DYNA 程序算法基础和使用方法. 北京: 北京理工大学, 1996

# ENGINEERING PRACTICE AND NUMERICAL SIMULATION ON THE MILLISECOND BLASTING FOR DITCHING DEEP BORE-HOLES

Gao Wenxue<sup>a</sup>, Jin Qiankun<sup>a</sup>, Yang Jun<sup>a</sup>, Huang Fenglei<sup>a</sup>,  
Duan Weidong<sup>b</sup>, Zhong Dongwang<sup>b</sup>

(a. *Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081*)

(b. *Wuhan Institute of Yiejing Science and Technology, Wuhan, 430081*)

**ABSTRACT** The engineering practice and the numerical simulation have been conducted on the millisecond blasting for ditching deep bore-hole. The movement of the rock in ditching and the mechanism of millisecond blasting were analyzed. The results show that the numerical simulation based on the engineering practice can be better revealing the dynamic course of fragmental rock, and helping to the blasting design.

**KEY WORDS** ditching, deep bore-hole, millisecond blasting, numerical simulation