

# 延期时间对逐孔预裂爆破振动衰减规律的影响

王建国<sup>1,4</sup>, 陶家龙<sup>1</sup>, 石飞<sup>2</sup>, 万再春<sup>3</sup>

- 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
- 云南上立矿业有限公司, 云南 昆明 650299;
- 云南铜业股份有限公司矿山研究院, 云南 昆明 650224;
- 云南省教育厅爆破新技术工程研究中心, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2024)04-0009-09

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2024.04.002

**摘要** 为了获得逐孔预裂爆破的最优延期时间, 基于 Ansys/LS-Dyna 有限元软件, 结合现场实验研究了不同延期时间下逐孔预裂爆破的振动衰减规律, 为实际工程应用提供了理论依据。结果表明: 与齐发起爆相比, 逐孔起爆可以有效地降低质点峰值振动速度( $PPV$ ), 特别是预裂沟附近区域; 随着延期时间的增大, 萨道夫斯基公式的  $K$  值逐渐减小, 而  $\alpha$  值变化不大, 当延期时间大于  $0.6T$  ( $T$  为单孔爆破振动持续时间) 时,  $K$  与  $\alpha$  的值趋于稳定, 接近于单孔爆破; 校正系数  $\beta$  与延期时间成反比, 最优延期时间应为  $0.6T \sim 1.0T$ ; 逐孔预裂成缝后对主爆区的减振率大于齐发预裂爆破。

**关键词** 预裂爆破; 逐孔起爆; 延期时间; 爆破振动; 数值模拟

## 引言

预裂爆破作为一种有效的减振技术<sup>[1-2]</sup>, 已被广泛应用于露天开采<sup>[3]</sup>、路基开挖<sup>[4]</sup>、坝基修建<sup>[5]</sup> 等工程。然而, 传统预裂爆破通常采用齐发方式起爆, 最大单响药量较大, 导致  $PPV$  值增大, 加剧了保留侧岩体的损伤<sup>[6-7]</sup>。因此, 控制预裂爆破自身的爆破振动是很有必要的。

工程实践表明, 延期时间是爆破的重要参数之一, 朱瑞庚等人<sup>[7]</sup> 提出通过增加延期时间, 可以实现更精细、更均匀的爆破碎石分布, 从而降低装药量与钻孔数量。但如何确定合理的延期时间是一个难点, 吴钦正等人<sup>[8]</sup> 结合经验公式, 使用二分法设计延期时间的两因素三水平方案, 以最大起爆孔数、质点峰值振动速度和空气冲击压力等参数为指标, 选择最优延期时间; 李清等人<sup>[9]</sup> 提出了多因素相关的孔间延期时间优选的计算方法, 根据计算结果, 得出掏槽孔和辅助孔延期时间可设置为  $3 \sim 5$  ms。李顺波等人<sup>[10]</sup> 基于弹性本波理论给出了合理的毫秒延时间隔时间的计算公式; 丁家仁等人<sup>[11]</sup> 采用动力有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建立引水隧洞周边孔简化的双孔爆炸破岩模

型, 得出了在相同光爆层厚度下双孔爆破后岩体叠加应力峰值随着周边孔间距的增大而降低; 兰小平<sup>[12]</sup> 为了探究微差延时临界值的变化规律, 在大理岩矿山进行了爆破实验, 发现了爆破效果与岩石性质、结构和炸药性能等有关; 高腾飞等人<sup>[13]</sup> 在昆明市某深基坑爆破开挖工程中进行爆破实验, 综合多方面考虑得出, 35 ms 延期方案效果是最佳的。韩增增<sup>[14]</sup> 在曼家寨露天采场进行了逐孔起爆现场实验, 得到了炸药单耗、孔间延时和孔间距等爆破参数。在预裂爆破方面, 叶海旺等人<sup>[15]</sup> 以损伤控制为标准, 结合数值模拟与现场实验确定了预裂爆破最优延期时间与最佳后爆孔孔距; 陈啸林等人<sup>[16]</sup> 通过数值模拟与模型实验相结合的方式, 给出了某露天矿山预裂爆破的最优延期时间为 12 ms。综观现有的研究成果, 可以发现, 对于延期时间的确定, 学者们的研究大多集中在生产爆破、掏槽爆破等方面, 而逐孔预裂爆破的研究更多偏向参数优化, 深入研究却很少。

本文借助 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件, 并结合现场实验, 研究了不同延期时间下逐孔预裂爆破的振动衰减规律, 并推导了  $PPV$  的变化与延期时间的关系, 最终确定了逐孔预裂爆破的最优延期时间。

收稿日期: 2024-04-09

基金项目: 云南省重大科技专项(202202AG050014); 云南省基础研究计划面上项目(202201AT070178)

作者简介: 陶家龙(1996—), 男, 云南丽江人, 硕士, 研究方向为岩石破碎与爆破技术, E-mail: Wintetao@163.com。

通信作者: 王建国(1987—), 男, 河南信阳人, 博士, 副教授, 研究方向为岩石动力学、爆炸与冲击理论、爆破技术与应用, E-mail: wangjg0831@163.com。

## 1 模型及参数选择

建立模型如图 1 所示,模型尺寸为  $30\text{ m}\times 3\text{ m}\times 14\text{ m}$ ,炮孔直径为  $11.5\text{ cm}$ ,孔间距为  $115\text{ cm}$ 。同时,在距炮孔水平距离( $R$ )处设置 5 个振动测点,距离炮孔的水平距离分别为  $6.84$ 、 $8.92$ 、 $13.08$ 、 $20.36$ 、 $28.86\text{ m}$ 。单孔爆破与双孔爆破的模型除了孔数不一样外,其余参数都一样。为了避免反射波的影响,在模型的底部和周围设置了非反射边界条件,模型的上表面为自由边界。岩石采用 Lagrange 算法,空气、炸药以及填塞使用 ALE 算法。

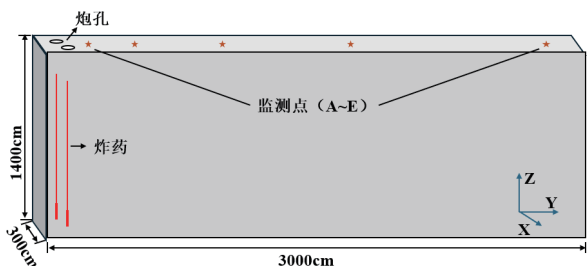


图 1 模型示意图

Fig. 1 Model diagram

以灰岩为例,岩石选用 HJC(HOLMQUIST\_JOHNSON\_CONCRETE)模型,材料参数见表 1;炸药为 2#岩石乳化炸药,选用 MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 模型,通过状态方程 EOS\_JWL 描述爆生产物的体积、压力及能量变化特性,材料及状态方程参数见表 2;空气采用 MAT\_NULL 模型,状态方程为 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL,材料及状态方程参数见表 3。

表 1 岩石材料及状态方程参数

Table 1 Rock material and equation of state parameters

| 参数名称                                   | 数值       | 参数名称                               | 数值                      |
|----------------------------------------|----------|------------------------------------|-------------------------|
| 密度 $R_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 2.6      | 损伤参数 $EF_{\min}$                   | 0.01                    |
| 单轴抗压强度 $f_c/\text{MPa}$                | 154      | 压力参数 $P_{\text{crush}}/\text{MPa}$ | 51                      |
| 单轴抗拉强度 $T/\text{MPa}$                  | 12.2     | 压力参数 $\mu_{\text{crush}}$          | 0.001 62                |
| 剪切模量 $G/\text{GPa}$                    | 28.7     | 压力参数 $P_{\text{lock}}/\text{GPa}$  | 1.2                     |
| 强度参数 $A$                               | 0.28     | 压力参数 $\mu_{\text{lock}}$           | 0.012                   |
| 强度参数 $B$                               | 2.5      | 压力参数 $K_1/\text{GPa}$              | 12                      |
| 强度参数 $C$                               | 0.001 86 | 压力参数 $K_2/\text{GPa}$              | 25                      |
| 强度参数 $N$                               | 0.79     | 压力参数 $K_3/\text{GPa}$              | 42                      |
| 强度参数 $S_{\max}$                        | 5.0      | 软件参数 $\dot{\epsilon}_0$            | $1.0000\times 10^{-11}$ |
| 损伤参数 $D_1$                             | 0.04     | 软件参数 $FS$                          | 0.035                   |
| 损伤参数 $D_2$                             | 1.0      |                                    |                         |

## 2 数值模拟结果

### 2.1 单孔爆破

为研究不同延期时间下预裂爆破的振动衰减规

表 2 炸药材料及状态方程参数

Table 2 Explosive materials and state equation parameters

| 参数名称                                    | 数值    | 参数名称                                       | 数值   |
|-----------------------------------------|-------|--------------------------------------------|------|
| 密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | 1.3   | 炸药常数 $\omega$                              | 0.15 |
| 爆速 $D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$     | 4 500 | 炸药常数 $R_1$                                 | 4.2  |
| 爆轰压力 $P_j/\text{GPa}$                   | 9.53  | 炸药常数 $R_2$                                 | 0.9  |
| 炸药常数 $A/\text{GPa}$                     | 214.4 | 初始体积内能 $E_0/(\text{GJ}\cdot\text{m}^{-3})$ | 3.87 |
| 炸药常数 $B/\text{GPa}$                     | 0.182 | 相对体积 $V_0$                                 | 1.0  |

表 3 空气状态方程参数

Table 3 Air state equation parameters

| 参数名称                                    | 数值                 | 参数名称                                       | 数值                  |
|-----------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------|---------------------|
| 密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ | 1.29               | 常量 $C_4$                                   | 0.4                 |
| 常量 $C_0/\text{MPa}$                     | $-1\times 10^{-6}$ | 常量 $C_5$                                   | 0.4                 |
| 常量 $C_1$                                | 0.0                | 常量 $C_6$                                   | 0.0                 |
| 常量 $C_2$                                | 0.0                | 单位体积内能 $E_0/(\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3})$ | $2.5\times 10^{-6}$ |
| 常量 $C_3$                                | 0.0                | 相对体积 $V_0$                                 | 1.0                 |

律,需先讨论单孔爆破,探究其爆破振动周期,再建立双孔预裂爆破模型,探究双孔爆破的振动波叠加规律<sup>[17]</sup>。

通过计算,提取单孔爆破 5 个测点不同方向的  $PPV$ ,如图 2 所示。从图 2 可以看出,水平径向( $Y$ 方向)的  $PPV$  最大,垂直方向( $Z$ 方向)次之,水平切向( $X$ 方向)最小。图 3 显示了  $R=6.84\text{ m}$  处水平径向振动波形曲线,可以看出振动持续时间约为  $10\text{ ms}$ 。

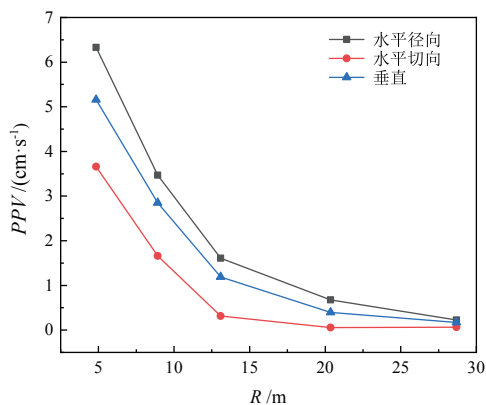


图 2 单孔爆破振动  $PPV$

Fig. 2 Single-hole blasting vibration  $PPV$

### 2.2 双孔爆破

通过单孔爆破可知,单孔爆破的振动持续约为  $10\text{ ms}$ 。因此,分别模拟  $\Delta t=0$ 、 $1$ 、 $3$ 、 $6$ 、 $10\text{ ms}$  时岩石的振动特性。

#### 2.2.1 双孔爆破振动

图 4 以  $\Delta t=0$ 、 $1$ 、 $10\text{ ms}$  在  $R=6.84\text{ m}$  处水平径向( $Y$ 方向)爆破振动波形为例。结果表明,随着  $\Delta t$  的增加,双孔爆破的两个振动速度峰值逐渐出现。当

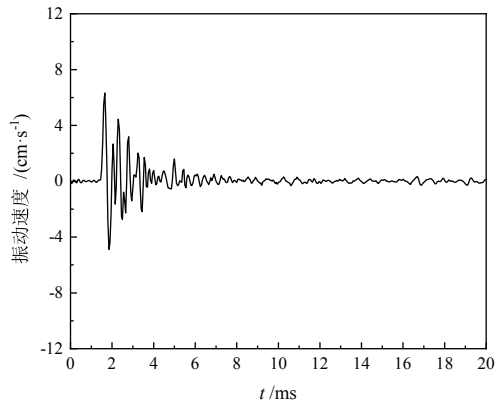


图3 水平径向振动波形

Fig. 3 Horizontal radial vibration waveform

$\Delta t=10$  ms 时,两个波段是独立的,因为 10 ms 接近单孔波形的持续时间。

图5显示了不同延期时间下水平径向  $PPV$  的变化情况。可以看出,逐孔爆破产生的  $PPV$  明显小于齐发爆破:(1)当  $\Delta t=0$  ms,即齐发起爆时, $PPV$  值最大,振动叠加度最高。这是因为逐孔爆破可以减少爆破的总装药量,从而使爆炸能量分阶段释放。齐发起爆时,装药量为 2 个孔的总量,逐孔起爆时,装药量为 1 个孔的总量。随着装药量的增加,爆破引起的振动增大。(2) $\Delta t>0$  ms 时,随着  $\Delta t$  的增大,振动叠加度减小, $PPV$  值减小。当  $\Delta t=1$  ms 时, $PPV$  接近  $\Delta t=0$  ms,振动叠加较大;当  $\Delta t=6$  ms 时,双孔爆破叠加后的  $PPV$  接近单孔爆破的  $PPV$ ,振动叠加较小;当  $\Delta t=10$  ms 时,双孔爆破叠加后的  $PPV$  值与单孔爆破的  $PPV$  值无差异;此时,延期时间与波形持续时间相同,几乎没有振动叠加。(3)与齐发起爆相比,逐孔爆破可以有效降低  $PPV$  值,特别是在附近区域;在  $R=6.84$ 、8.92、13.08、20.36、28.86 m 测点,不同延期时间下  $PPV$  的分布范围分别为 0.651~12.533、0.431~10.746、0.381~9.363、0.297~6.724 和 0.253~6.361 cm/s,可以看出,不同延期时间下  $PPV$  的分布范围随着距离的增大而减小。

结果表明,延期时间对远距离测点的  $PPV$  影响较小,而对近距离测点的  $PPV$  影响较大。设置较大的延期时间对振动控制效果较好,但会增加整体振动持续时间,这对于工程实践来说是不合理的<sup>[18]</sup>。因此,在工程实践中需要合理选择延期时间,不宜过大或过小。

### 2.2.2 数据拟合及修正系数

#### (1) 数据拟合

我国《爆破安全规程》(GB 6722—2014)中推荐的峰值振速衰减规律计算公式为萨道夫斯基公式<sup>[19-20]</sup>,见式(1):

$$PPV = K \left( \frac{\sqrt{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中, $PPV$ 为质点峰值振动速度,cm/s; $Q$ 为最大单响

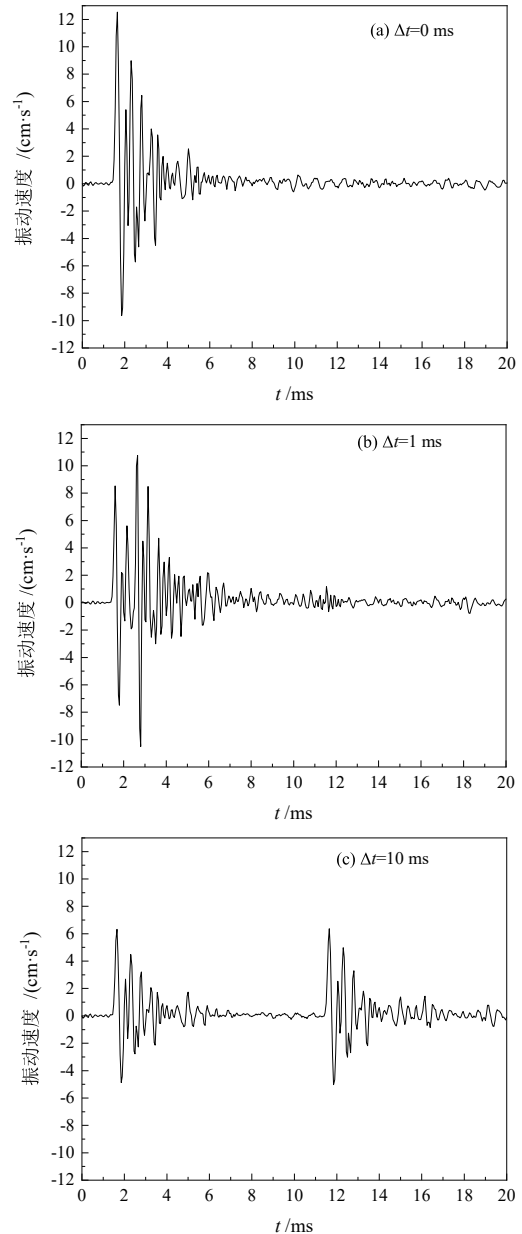
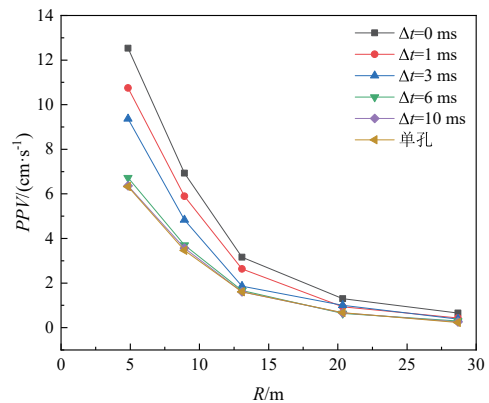


图4 不同延期时间下预裂爆破振动波形

Fig. 4 Pre-splitting blasting vibration waveform under different delay time

图5 不同延期时间下水平径向  $PPV$ Fig. 5 Horizontal radial  $PPV$  at different delay times

药量, kg;  $R$  为爆源至测点的水平距离, m;  $K, a$  为与地形和地质条件有关的参数。

将数值模拟采集的数据进行萨道夫斯基公式线性拟合, 结果如图 6 所示。

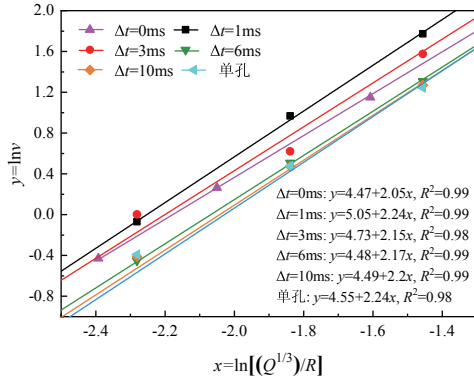


图 6 水平径向 PPV 一元线性回归

Fig. 6 Horizontal radial PPV linear regression

经过计算, 可以得到不同延期时间下的萨道夫斯基公式, 见表 4。齐发爆破时, 最大单响药量为两个孔的总和,  $K$  值与  $\alpha$  值都小于单孔爆破, 但相差不大。当  $0\text{ ms} < \Delta t < 6\text{ ms}$  时, 可以发现,  $K$  值随着延期时间的增大而减小, 分别为 156、113.3、88.2, 而  $\alpha$  值却变化不大; 当延期时间  $\Delta t = 6 \sim 10\text{ ms}$ ,  $K$  值与  $\alpha$  值开始趋于稳定, 接近于单孔爆破。定义单孔爆破的振动周期为  $T$ , 逐孔预裂爆破下, 最优延期时间应为  $0.6 \sim 1.0T$ 。

表 4 炸药材料及状态方程参数

Table 4 Explosive materials and state equation parameters

| $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | $A/\text{GPa}$ | $B/\text{GPa}$ | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ |
|--------------------------------------|----------------------------------|----------------|----------------|-------|-------|----------|
| 1.3                                  | 4 500                            | 214.4          | 0.182          | 4.2   | 0.9   | 0.15     |

## (2) 修正系数

为了量化 PPV 的变化与延期时间的关系, 定义  $\beta$  为延期时间为  $\Delta t$  时径向振动 PPV 的修正系数:

$$\beta = \frac{PPV_{\Delta t}}{PPV_s} \quad (2)$$

式中,  $PPV_s$  为单孔爆破径向振动 PPV,  $PPV_{\Delta t}$  为不同延期时间下双孔爆破的径向振动 PPV。

将萨道夫斯基公式带入式(2), 当  $\Delta t$  为常数时:

$$PPV_s = K_s \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{\alpha_s} \quad (3)$$

$$PPV_{\Delta t} = K_{\Delta t} \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{\alpha_{\Delta t}} \quad (4)$$

单孔爆破装药量与逐孔爆破最大装药量相同, 均为  $Q$ , 代入式(2):

$$\beta = \frac{K_{\Delta t}}{K_s} \left( \sqrt[3]{Q} \right)^{(\alpha_{\Delta t} - \alpha_s)} \cdot \left( \frac{1}{R} \right)^{(\alpha_{\Delta t} - \alpha_s)} \quad (5)$$

可以看出,  $\beta$  与  $R$  呈反比函数关系。将  $\frac{K_{\Delta t}}{K_s} \left( \sqrt[3]{Q} \right)^{(\alpha_{\Delta t} - \alpha_s)} =$

$K_Q$ ,  $\alpha_{\Delta t} - \alpha_s = \alpha_Q$ 。则式(5)可写成:

$$\beta = K_Q \left( \frac{1}{R} \right)^{\alpha_Q} \quad (6)$$

若单孔爆破波形持续时间为  $T$ , 令  $\Delta t = nT$ ; 在本次模拟实验中,  $T = 10\text{ ms}$ , 则  $n = \Delta t / 10$ 。当距离  $R$  一定时, 从图 7 中可以看出, 随着  $n$  的增加,  $\beta$  与  $n$  近似成反比。当  $\Delta t > 0$  时,  $\beta$  与  $R, n$  成反比:

$$\beta = b_1 \left( \frac{1}{R} \right)^{b_2} \left( \frac{1}{n} \right)^{b_3} \quad (7)$$

式中:  $b_1, b_2, b_3$  为常数。

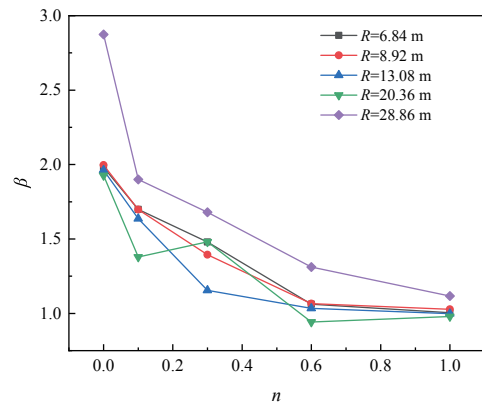


图 7 不同延期时间下  $\beta$  的变化

Fig. 7 Change of  $\beta$  under different delay time

对式(7)的两端取对数可得:

$$\ln \beta = \ln b_1 - b_2 \ln R - b_3 \ln n \quad (8)$$

令  $\ln \beta = y$ ,  $\ln n = x$ ,  $\ln b_1 = a$ ,  $b = b_2$ ,  $c = b_3$ , 则上式可以写成:

$$y = a - b \ln R - cx \quad (9)$$

将  $R = 6.84\text{ m}$  处的数据带入式(9), 采用 Origin 软件基于最小二乘法对其进行线性拟合, 如图 8 所示,  $R_2 = 0.88$ 。经过计算可以得出,  $b_1 = 2.718$ ,  $b_2 = 0.759$ ,  $b_3 = 0.233$ , 则:

$$\beta = 2.718 \left( \frac{1}{R} \right)^{0.759} \left( \frac{1}{n} \right)^{0.233} = 2.718 \left( \frac{1}{R} \right)^{0.759} \left( \frac{T}{\Delta t} \right)^{0.233} \quad (10)$$

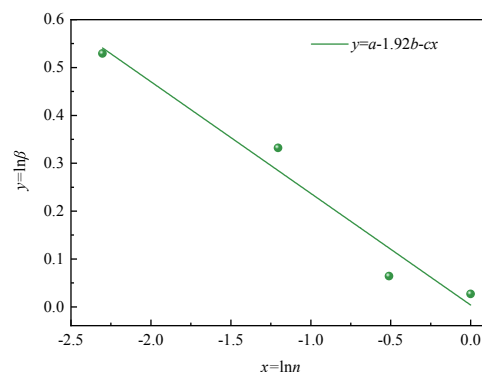


图 8  $\beta$  与  $n$  的一元线性回归

Fig. 8 Unary linear regression of  $\beta$  and  $n$



### 3 逐孔预裂爆破减振效果分析

### 3.1 实验及爆破参数设计

### 3.1.1 实验设计

实验场地位于云南省安宁市县街甸西村云龙山磷矿。本次爆破区域分为齐发预裂爆破区、逐孔预裂爆破区、主爆区。在主爆区后方左右两侧分别设置

10个预裂孔,左侧为齐发起爆,右侧为逐孔起爆,延期时间设置为10 ms。使用TC-4850高精度爆破测振仪进行数据采集,布孔方式、起爆网路图及测振仪器布置如图9所示。

### 3.1.2 爆破参数

### (1) 主爆区域

为不影响矿山的正常生产作业要求,主爆区的爆破参数按照矿山的爆破设计标准进行设计,具体参数见表5。

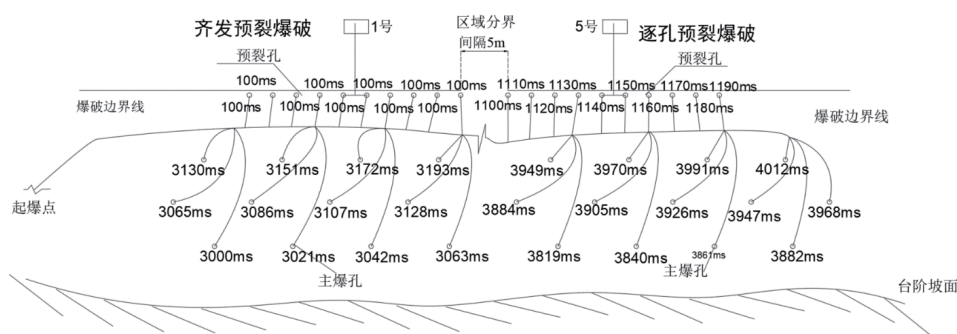


图9 对比实验方案设计

**Fig. 9** Comparison test scheme design

表 5 水平径向  $PPV$  拟合公式**Table 5** Horizontal radial *PPV* fitting formula

| 延期时间                       | 公式                                                        |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------|
| 单孔                         | $PPV = 94.6 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.24}$  |
| $\Delta t = 0 \text{ ms}$  | $PPV = 87.4 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.05}$  |
| $\Delta t = 1 \text{ ms}$  | $PPV = 156 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.24}$   |
| $\Delta t = 3 \text{ ms}$  | $PPV = 113.3 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.15}$ |
| $\Delta t = 6 \text{ ms}$  | $PPV = 88.2 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.17}$  |
| $\Delta t = 10 \text{ ms}$ | $PPV = 89.1 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.2}$   |

## (2) 预裂爆破区域

根据前文计算以及数值模拟优化,主爆区和预裂爆破区的爆破参数分别见表6和表7,齐发起爆区域与逐孔起爆区域除起爆方式不同外,其余参数相同。

### (3) 装药结构

主爆孔的装药结构采用连续耦合的装药结构,如图 10(a) 所示;预裂孔的装药结构采用线性连续装药结构,如图 10(b) 所示。

### 3.2 预裂爆破数据分析

### 3.2.1 单孔起爆数据回归分析

本次实验首先通过单孔爆破确定该矿山地质条件下的萨道夫斯基公式的系数  $K$  和  $\alpha$  值, 为后续测试和分析齐发爆破和逐孔爆破形成的预裂沟对主爆区的减振效果做准备。单孔装药量为 54 kg, 由近及远

表 6 主爆区爆破参数

**Table 6** Blasting parameters of main blasting area

| 序号 | 技术名称    | 单位   | 数量   | 备注   |
|----|---------|------|------|------|
| 1  | 钻孔直径    | mm   | 140  |      |
| 2  | 底盘抵抗线   | m    | 4    |      |
| 3  | 工作台阶高度  | m    | 10   |      |
| 4  | 孔间距     | m    | 4    |      |
| 5  | 孔排距     | m    | 4    |      |
| 6  | 超深      | m    | 2    |      |
| 7  | 钻孔深度    | m    | 10   |      |
| 8  | 布孔方式    |      |      | 梅花形  |
| 9  | 钻孔角度    | °    | 90   | 垂直孔  |
| 10 | 钻孔排数    | 排    | 4    |      |
| 11 | 装药结构    |      |      | 连续装药 |
| 12 | 线装药密度   | kg/m | 10.1 |      |
| 13 | 总孔深     | m    | 1400 |      |
| 14 | 孔口充填高度  | m    | >3.0 |      |
| 15 | 平均单孔装药量 | kg/孔 | 56.9 |      |
| 16 | 总孔数     | 个    | 130  |      |

表 7 预裂爆破区域爆破参数

Table 7 Blasting parameters of pre-splitting blasting area

| 序号 | 参数名称  | 单位   | 数值   | 备注                 |
|----|-------|------|------|--------------------|
| 1  | 预裂孔孔径 | mm   | 115  |                    |
| 2  | 不耦合系数 |      | 3.59 |                    |
| 3  | 孔距    | m    | 1.2  |                    |
| 4  | 孔深    | m    | 10   |                    |
| 5  | 超深    | m    | 2    |                    |
| 6  | 总孔深   | m    | 12   |                    |
| 7  | 钻孔角度  | °    | 90   |                    |
| 8  | 填塞长度  | m    | 3    |                    |
| 9  | 线装药密度 | kg/m | 0.9  |                    |
| 10 | 单孔装药量 | kg   | 9    | 2卷Φ90+24卷Φ32       |
| 11 | 装药结构  |      |      | 线性连续装药             |
| 12 | 总孔数   |      | 20   | 10个齐发预裂孔, 10个逐孔预裂孔 |

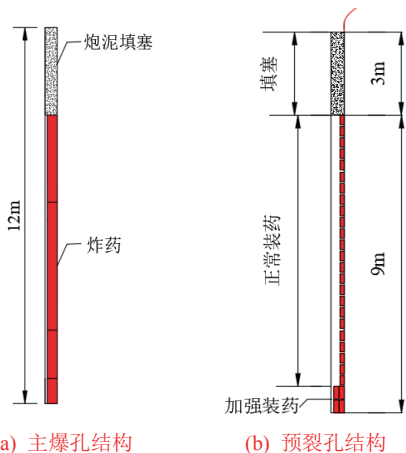


图 10 装药结构示意图

Fig. 10 Charging structure diagram

布置 5 台测振仪, 构成一条测线, 爆心距分别为 20.2、40.2、69.2、98、158 m, 表 8 为各个测点所测在 X、Y、Z 三个方向的 PPV。

表 8 测振仪所测 PPV 数据

Table 8 Data measured by vibrometer

| 测点方向 | 1号测点 | 2号测点 | 3号测点 | 4号测点 | 5号测点 |
|------|------|------|------|------|------|
| X    | 3.28 | 0.91 | 0.43 | 0.28 | 0.15 |
| Y    | 3.73 | 1.78 | 0.67 | 0.40 | 0.28 |
| Z    | 7.33 | 1.57 | 0.78 | 0.49 | 0.34 |

对表 8 测得数据中 X、Y、Z 方向上速度的最大值进行萨道夫斯基公式线性拟合, 拟合结果如图 11 所示。

X 方向上线性回归方程为  $y=2.260x+2.313$ ,  $K=205.59$ ,  $\alpha=2.26$ ; 萨道夫斯基公式表达式为:

$$PPV = 205.59 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.26} \quad (11)$$

Y 方向上线性回归方程为  $y=1.274x+1.485$ ,  $K=60.55$ ,

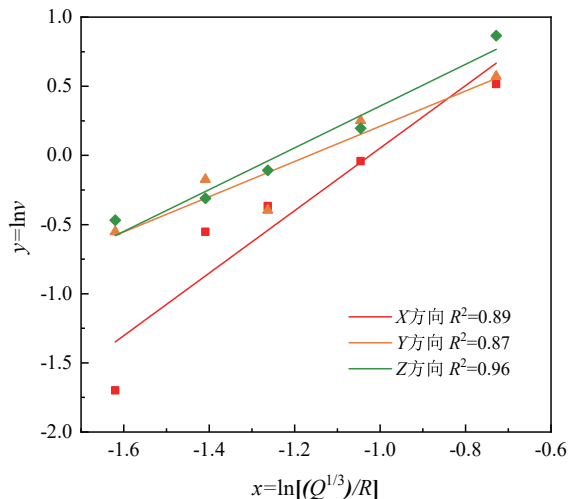


图 11 测点不同方向一元线性回归

Fig. 11 Monadic linear regression in different directions of measuring points

$\alpha=1.274$ ; 萨道夫斯基公式表达式为:

$$PPV = 60.55 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.274} \quad (12)$$

Z 方向上线性回归方程为  $y=1.510x+1.867$ ,  $K=83.62$ ,  $\alpha=1.51$ ; 萨道夫斯基公式表达式为:

$$PPV = 83.62 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{1.51} \quad (13)$$

### 3.2.2 两种预裂爆破方案减振效果对比

几个监测点布置见图 9, 1 号和 5 号为同一水平布置并且与主爆区的爆心距都相同, 通过数据对比分析发现, 齐发起爆和逐孔起爆形成的预裂沟能明显减弱主爆区产生的爆破振动的效果, 表 9 为 1 号测点和 5 号测点数据分析对比。

表 9 1 号和 5 号数据对比

Table 9 Comparison of No.1 and No.5 data

| 测点 | 方向 | 爆心距/m | 计算爆破振动/(cm·s <sup>-1</sup> ) | 实测爆破振动/(cm·s <sup>-1</sup> ) | 减振率/% |
|----|----|-------|------------------------------|------------------------------|-------|
| 1号 | X  | 14    | 16.45                        | 12.145                       | 26    |
|    | Y  | 14    | 14.58                        | 13.409                       | 8     |
|    | Z  | 14    | 15.5                         | 15.010                       | 3     |
| 5号 | X  | 14    | 16.45                        | 5.772                        | 65    |
|    | Y  | 14    | 14.58                        | 3.168                        | 78    |
|    | Z  | 14    | 15.5                         | 8.636                        | 44    |

1 号测点和 5 号测点距离主爆区 14 m, 1 号测点 (位于齐发预裂爆破成缝的背后) 三个方向的实测振动速度分别为 12.145、13.409、15.010 cm/s, 5 号测点 (位于逐孔预裂爆破成缝的背后) 三个方向的实测振动速度分别为 5.772、3.168、8.636 cm/s; 5 号测点三个方向的爆破振动均小于 1 号测点, 逐孔预裂对主爆区

的减振率均大于齐发预裂对主爆区的减振率。

## 4 结论

延期时间的设置在逐孔预裂爆破当中起着至关重要的作用,通过齐发预裂爆破与逐孔预裂爆破作对比,可以发现逐孔预裂爆破确实对矿山爆破的振动效应具有显著作用,数值模拟得出的振动衰减规律可以为矿山实际工程应用提供理论依据。通过研究,本文得出以下结论:

(1)齐发起爆时,PPV最大。逐孔起爆时,随着延期时间的增大,PPV在逐渐减小。在 $R=6.84$ 、 $8.92$ 、 $13.08$ 、 $20.36$ 、 $28.86$  m测点, $\Delta t=0\sim 10$  ms的PPV分布范围分别为 $0.651\sim 12.533$ 、 $0.431\sim 10.746$ 、 $0.381\sim 9.363$ 、 $0.297\sim 6.724$ 和 $0.253\sim 6.361$  cm/s,差异近大远小。

(2)逐孔起爆时,随着延期时间的增大,萨道夫斯基公式的 $K$ 值逐渐降低,分别为 $156$ 、 $113.3$ 、 $88.2$ 、 $89.1$ , $\alpha$ 值变化不大,分别为 $2.24$ 、 $2.15$ 、 $2.17$ 、 $2.2$ 。当延期时间大于 $0.6T$ 时, $K$ 与 $\alpha$ 的值趋于稳定,接近于单孔爆破,最优延期时间应为 $0.6T\sim 1.0T$ 。校正系数 $\beta$ 与延期时间成反比。

(3)齐发预裂后方 $14$  m处 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三个方向的减振率分别为 $26\%$ 、 $8\%$ 、 $3\%$ ,逐孔预裂后方 $14$  m处 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三个方向的减振率分别为 $65\%$ 、 $78\%$ 、 $44\%$ ,说明逐孔预裂成缝后对主爆区的减振效率大于齐发预裂爆破。

## 参考文献:

- [1] 尹忠昌,宋俊生,胡少银,等.坚硬顶板切缝药包深孔预裂松动爆破技术研究[J].矿业科学学报,2021,6(6):696-702.  
YIN Z C, SONG J S, HU S Y, et al. Research on deep hole pre-splitting loosening blasting technology of hard roof cutting seam chargepack[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(6): 696-702.
- [2] 解嘉豪,韩刚,孙凯,等.邻空巷坚硬顶板预裂爆破防冲机理及效果检验[J].煤炭学报,2023,48(5):2078-2091.  
XIE J H, HAN G, SUN K, et al. Rockburst prevention mechanism and effect test of blast presplitting of hard roof in gob-side roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 2078-2091.
- [3] 郑超,黄原明,赵艳伟,等.大红山铜矿点柱预裂爆破损伤控制[J].有色金属工程,2024,14(5):104-112.  
ZHENG C, HUANG Y M, ZHAO Y W, et al. Damage control of point pillar presplitting blasting in dahongshan copper mine[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2024, 14(5): 104-112.
- [4] 顾毅成.从光面(预裂)爆破的应用谈爆破技术的进步与发展[J].铁道工程学报,2010,27(1):77-81.  
GU Y C. Comments on the progress and development of blasting technology from application of smooth (presplitting) blasting[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(1): 77-81.
- [5] 高启栋,张宸,范勇,等.坝基缓坡预裂开挖中不同布孔方式下的

爆破扰动比较分析[J].岩土工程学报,2024,46(5):1018-1029.

- GAO Q D, ZHANG C, FAN Y, et al. Comparison and analysis of blasting disturbance under different hole arrangement in presplitting excavation of dam foundation gentle slope[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(5): 1018-1029.
- [6] S DIDONATO N N, HERSCHKOWITZ U N, WIESMANN. Effect of chloroquine on cultured fibroblasts: release of lysosomal hydrolases and inhibition of their uptake[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 1975, 66(4): 1338-1343.
- [7] ZHU R G, CHENG K, LU W X. A new method of fracture blast by time-order-ignition[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 1993, 1(1): 40-46.
- [8] 吴钦正,李润然,李桂林,等.基于JKSimBlast软件的露天矿爆破毫秒延期时间优化[J].黄金科学技术,2021,29(6):854-862.  
WU Q Z, LI R R, LI G L, et al. Optimization of millisecond delay blasting time in open pit mine based on JKSimBlast software[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(6): 854-862.
- [9] 李清,于强,张迪,等.地铁隧道精确控制爆破延期时间优选及应用[J].振动与冲击,2018,37(13):135-140+170.  
LI Q, YU Q, ZHANG D, et al. Metro tunnel precisely controlled blasting's delay time optimization and its application[J]. Journal of Vibration And Shock, 2018, 37(13): 135-140+170.
- [10] 李顺波,杨军,李长军.基于精确延时的基坑开挖爆破振动控制研究[J].爆破器材,2015,44(6):9-14.  
LI S B, YANG J, LI C J. Control of blasting vibration in foundation pit excavation based on the precise time delay[J]. Blasting Materials, 2015, 44(6): 9-14.
- [11] 丁家仁,曹华彰,蒋楠,等.引水隧洞光面爆破参数优化数值模拟及现场试验研究[J].安全与环境工程,2023,30(5):46-53.  
DING J R, CAO H Z, JIANG N, et al. Numerical optimization and field test of smooth blasting parameters for diversion tunnel[J]. Safety and Environmental Engineering, 2023, 30(5): 46-53.
- [12] 兰小平.数码电子雷管逐孔起爆网路延时时间应用探讨[J].工程爆破,2019,25(2):57-66.  
LAN X P. Discussion on application of delay time in hole-by-hole initiation network of digital electronic detonators[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(2): 57-66.
- [13] 高腾飞,张智宇,王鑫尧,等.城镇浅孔爆破逐孔起爆合理延时的研究[J].爆破,2016,33(1):78-83.  
GAO T F, ZHANG Z Y, WANG X Y, et al. Study on reasonable interval time of hole-by-hole initiation in town short-hole blasting[J]. Blasting, 2016, 33(1): 78-83.
- [14] 李祥龙,张其虎,王建国,等.地下爆破精确延时逐孔起爆减振试验研究[J].黄金科学技术,2021,29(3):401-410.  
LI X L, ZHANG Q H, WANG J G, et al. Experimental study on precise delay hole-by-hole blasting vibration reduction of underground blasting[J]. Gold Science and Technology, 2021, 29(3): 401-410.
- [15] 叶海旺,唐可,万涛,等.时序控制预裂爆破参数优化及应用[J].爆炸与冲击,2017,37(3):502-509.  
YE H W, TANG K, WAN T, et al. Optimization of time sequence

- controlled pre-splitting blasting parameters and its application[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(3): 502–509.
- [16] 陈啸林, 张智宇, 王凯, 等. 某露天矿山预裂爆破参数优选与试验研究[J]. 高压物理学报, 2023, 37(6): 181–194.
- CHEN X L, ZHANG Z Y, WANG K, et al. Optimization and experimental study of pre-splitting blasting parameters in a certain open-pit mine[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(6): 181–194.
- [17] F J BARRANTES D MARSH. Immobilized lipid in acetylcholine receptor-rich membranes from Torpedo marmorata[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1978, 75(9): 4329–4333.
- [18] H. Z. YUE, C. YU, H. B. LI, et al. The effect of blast-hole arrangement, delay time, and decoupling charge on rock damage and vibration attenuation in multihole blasting[J]. Shock and Vibration, 2022, 2022: 1–18.
- [19] 梁瑞, 王树江, 周文海, 等. 基于回归分析的边坡爆破振速高程效应研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(2): 107–115.
- LIANG R, WANG S J, ZHOU W H, et al. Research on elevation effect of slope blasting vibration based on regression analysis[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(2): 107–115.
- [20] 付晓强, 麻岩, 俞缙, 等. 隧道爆破振动信号时频谱增强优化分析[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(3): 348–356.
- FU X Q, MA Y, YU J, et al. Optimization analysis of time frequency spectrum enhancement of tunnel blasting vibration signal[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(3): 348–356.



## Effect of Delay Time on Attenuation Law of Blasting Vibration in Hole-by-hole Presplitting

WANG Jianguo<sup>1,4</sup>, TAO Jialong<sup>1</sup>, SHI Fei<sup>2</sup>, WAN Zaichun<sup>3</sup>

1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China;

2. Yunnan Shangli Mining Co., Kunming 650299, Yunnan, China;

3. Mining Institute of Yunnan Copper Co., LTD, Kunming 650224, Yunnan, China;

4. Advanced Blasting Technology Engineering Research Center of Yunnan Provincial Department of Education, Kunming 650093, Yunnan, China

**Abstract:** To obtain the optimal delay time of hole-by-hole pre-splitting blasting, based on Ansys / LS-Dyna finite element software, combined with field experiments, this paper studies the vibration attenuation law of hole-by-hole pre-splitting blasting under different delay time, which provides a theoretical basis for practical engineering application. The results showed that compared with the simultaneous initiation, the hole-by-hole initiation effectively reduced the peak particle vibration velocity (PPV), especially in the area near the pre-split trench. As the delay time increased, the  $K$  value of the Sadaovsk formula gradually decreased, while the  $\alpha$  value did not change much. When the delay time was greater than  $0.6T$  ( $T$  was the duration of single-hole blasting vibration), the values of  $K$  and  $\alpha$  tended to be stable and close to single-hole blasting. The correction coefficient  $\beta$  was inversely proportional to the delay time, and the optimal delay time should be  $0.6T \sim 1.0T$ ; the vibration reduction rate of the main blasting area after hole-by-hole pre-splitting was greater than that of the simultaneous pre-splitting blasting.

**Keywords:** pre-splitting blasting; hole-by-hole blasting; delay time; blasting vibration; numerical simulation

引用格式: 王建国, 陶家龙, 石飞, 万再春. 延期时间对逐孔预裂爆破振动衰减规律的影响[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(4): 9–17.

WANG Jianguo, TAO Jialong, SHI Fei, WAN Zaichun. Effect of delay time on attenuation law of blasting vibration in hole-by-hole presplitting[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(4): 9–17.

投稿网址: <http://kcbhyly.xml-journal.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)



### 作者简介:

王建国, 1987 年生, 博士/博士后, 硕士生导师。从事爆炸力学、岩石动态破碎与爆破技术研究。云南省“兴滇英才”青年人才, 中国有色金属学会深地矿建与资源开发专委会委员, 高级爆破工程技术人员, IJMST、矿业科学学报等期刊青年编委,《现代矿业》专家委员会委员。主持纵横科研项目 10 余项, 发表 SCI/EI 论文 40 余篇, 授权发明专利 20 余项, 出版专著 1 部。