

# 数码电子雷管逐孔起爆下质点峰值 振速预测研究

Prediction of Particle Peak Vibration Velocity under Hole-by-hole  
Initiation of Digital Electronic Detonator

贾 贝<sup>1,2</sup>, 熊赞民<sup>1,2</sup>, 郭 雷<sup>1,2</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038)

**摘 要:**针对电子雷管起爆技术采用传统经验公式预测质点峰值振速精度较低的问题, 本文根据电子雷管爆破施工的特点, 将其按炮孔类型的不同进行分类, 提出了一种分段式的质点峰值振速预测方法, 并结合金属矿山巷道爆破进行了试验。结果表明: 传统萨道夫斯基经验公式不适用于数码电子雷管爆破的质点峰值振速预测; 按照延期时间将炮孔分类后, 其质点峰值振速可利用萨道夫斯基经验公式进行预测, 选取比例距离药量下各类型炮孔的预测值最大的部分, 基于此组成拟合曲线, 此组合式曲线具有较好的拟合效果。

**关键词:**巷道爆破; 数码电子雷管; 质点峰值振速; 振速预测

**中图分类号:** TD235 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)01-0032-04

**Abstract:** Aiming at the problem of low accuracy of predicting particle peak velocity by traditional empirical formula in electronic detonator initiation technology, this paper classifies the particle peak velocity according to different hole types according to the characteristics of electronic detonator blasting construction, and proposes a piecewise particle peak velocity prediction method, which is combined with metal mine tunnel blasting. The results show that the traditional Sadowski empirical formula is not suitable for predicting the peak particle velocity of electronic detonator blasting; After sorting the holes according to the delay time, the peak particle velocity can be predicted by Sadowski empirical formula. The part with the largest predicted value of each type of blast holes under the proportional distance charge is selected. Based on this, the combined curve has a better fitting effect.

**Key words:** tunnel blasting; digital electronic detonator; particle peak vibration velocity; vibration velocity prediction

## 1 前言

随着我国国民经济的快速增长, 各行业对于矿产资源的需求日渐增长, 对矿山安全高效的开采提出了新的挑战。爆破振动作为矿山爆破施工过程中的最大危害, 是矿山安全生产建设的首要控制目标<sup>[1-2]</sup>。

数码电子雷管作为一种新型的起爆器材, 因具有精确的控制起爆时间的能力, 近年来被广泛的应用于金属矿山爆破当中<sup>[3]</sup>。与传统的导爆式雷管相比, 数码电子雷管起爆时间的误差可以控制在 1 ms 以内, 对矿山爆破孔网参数设计、爆破振动和块度的控制具有重要的意义<sup>[4]</sup>。

为了降低爆破振动对周边环境的影响, 一般采用逐孔起爆的方式进行起爆<sup>[5]</sup>。然而, 经过研

究发现传统的萨道夫斯基经验公式对此方式下质点峰值振速的预测精度较低。为了解决此问题, 研究人员<sup>[6]</sup>对比分析了电子雷管与导爆管两种起爆方式的振动衰减规律, 提出以能量各频带能量来表示振动强度的方法; 此外, 诸如轻型梯度提升机、神经网络、粒子群优化等算法被用来预测质点峰值振速<sup>[7-9]</sup>, 并取得了较好的预测效果。然而, 上述方法在预测振动时需要大量的现场数据作为样本, 且建立的预测公式缺乏明确的物理意义, 在实际工程的应用中具有一定难度, 并不能被大规模应用。

基于上述情况, 本文以某铜矿巷道的爆破施工为研究背景, 采用理论分析和现场试验的方法, 深入研究了数码电子雷管的质点峰值振速的衰减规律,

[作者简介] 贾贝(1993—), 男, 博士后, 主要从事矿山爆破工程咨询及设计研究工作。

[基金项目] 国家“十四五”重点研发计划项目(2023YFC2907201)。

[引用格式] 贾贝, 熊赞民, 郭雷. 数码电子雷管逐孔起爆下质点峰值振速预测研究[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(1): 32-35+59.

在传统的质点峰值振速预测方法的基础上,提出了一种分段式的质点峰值振速预测方法,以提高其质点峰值振速的预测精度,为数码电子雷管的安全应用提供一定的帮助。

## 2 工程概况

### 2.1 地质条件

经现场地质调查,钻探勘察,结合岩石鉴定,试验巷道主要为英安斑岩体,南北两侧接触带及其外侧发育裂隙构造的蚀变千枚岩、以及少量角砾岩、蚀

变石英闪长岩。

### 2.2 爆破参数

本次巷道爆破施工采用数码电子雷管全断面逐孔起爆,依据以往工程经验和巷道地质条件,对电子雷管的爆破参数进行了设置,爆破参数见表1。由表1可知,此次爆破设置了掏槽孔、扩槽孔、破碎空、底边孔和周边孔共计5种不同类型的炮孔,8个炮孔起爆段别,各段别之间的延期时间均为150 ms。

表1 电子雷管爆破参数

炮孔部位	炮孔数量	炮孔深度/s	单孔药量/kg	总药量/kg	孔间延期/ms	起爆时间/ms
掏槽孔	24	3.5	2.4	24	15	0 ~ 150
扩槽孔	10	3.4	1.8	18	25	300 ~ 550
破碎孔	16	3.2	1.5	24	25	700 ~ 1 100
	20	3.2	1.5	30	25	1 250 ~ 1 700
	22	3.2	1.5	33	25	1 850 ~ 2 400
底边孔	33	3.2	1.5	49.5	25	2 550 ~ 3 375
	20	3.5	2.1	42	6	3 500 ~ 3 620
周边孔	48	3.2	0.6	28.8	6	3 770 ~ 4 058

### 2.3 测点布置

本次试验使用TC-4850型爆破测振仪进行监测,仪器采用内触发的模式,触发电平设置为0.02 cm/s,采样频率设置为8 000 Hz,触发延时设置为-500 ms。根据巷道爆破施工情况,现场共布置了4个测点,测点均布置于巷道拱腰位置,其详细的布置如图1所示。

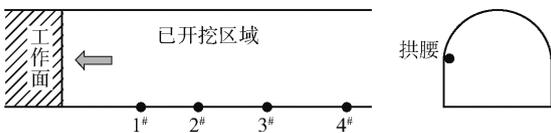


图1 现场测点布置示意图

## 3 质点峰值振速预测公式

### 3.1 传统质点峰值振速预测公式

19世纪初期,随着炸药的逐渐普及,爆破施工带来的次生灾害也逐渐得到了人们的重视。为了降低爆破次生灾害对周边构筑物的危害,国外学者统计了大量集中装药的爆破施工实测数据,分析发现岩石爆破中质点峰值速度的大小对周边构筑物的破坏程度具有很大影响,且爆心距和单响最大药量被认为是影响其大小的主要因素,因此建议质点峰值振速公式为

$$v = kQ^n R^m \quad (1)$$

式中, $v$ 为质点峰值振速,cm/s; $k$ 为与地质相关的场地参数; $Q$ 为单响药量,kg; $R$ 为爆心距,m。

不同国家和地区根据本地条件,在式(1)的基础上总结出了适用于当地的经验公式。目前,我国使用的为前苏联科学家总结的萨道夫斯基经验公式<sup>[10]</sup>,如式(2)所示。

$$v = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (2)$$

式中, $K_v$ 、 $\alpha_v$ 为与地形、地质条件有关的系数和衰减指数。

### 3.2 分段式质点峰值振速预测方法

传统的质点峰值振速预测公式的是由半无限空间下球形药包的集中装药的前提下总结出来的,然而数码电子雷管的逐孔起爆方式使得炸药并不能被视作集中装药的起爆,使得传统公式的预测精度下降。因此,此本文提出了一种分段式的质点峰值振速预测方法,其详细步骤如下。

(1)基于电子雷管爆破中延期时间的设计,按照炮孔类型的不同,分别提取出不同类型炮孔对应的爆破振动。

(2)利用萨道夫斯基经验,选取爆心距和单孔最大药量作为变量,分别求取不同类型炮孔对应的

经验公式。

(3)以不同类型炮孔的萨氏预测公式为基础,选取各比例距离药量下的预测值最大的部分组成拟合曲线,此组合式曲线即为对应的分段式质点峰值振速曲线。

### 4 测试结果与回归分析

#### 4.1 爆破振动测试结果分析

以某日电子雷管逐孔起爆试验中1#测点和4#测点的采样数据为例,爆破振动的时程曲线如图2所示。由图2可看出,1#测点和4#测点的最大峰值振速分别为4.41 cm/s和1.43 cm/s,且对应炮孔类型为扩槽孔和底边孔,单孔药量为1.8 kg和2.1 kg。传统振速预测公式的前提假设为最大峰值振速由单孔药量最大的炮孔产生,而此次爆破试验中单孔药量最大的炮孔为掏槽孔,并不符合假设。

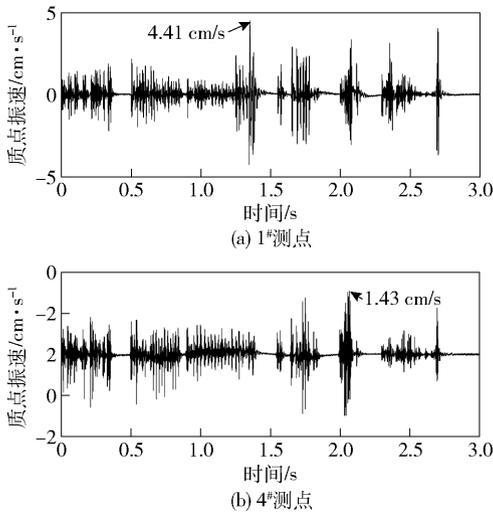


图2 某日1#测点和4#测点的爆破振动的时程曲线

为了排除偶然因素的影响,分别统计了不同爆破参数下的试验结果,具体类型见表2。由表2可知,大部分测点的最大单孔药量对应炮孔类型与最大峰值振速对应炮孔类型不相同。因此,利用传统振速预测公式分析电子雷管的峰值振速衰减规律是不合理的。

#### 4.2 振速预测公式的拟合

本次数码电子雷管爆破试验共采集到了27组有效数据,基于表1中的起爆时间将每条数据按照炮孔类型的不同进行分类,识别其对应的最大峰值振速后,带入到萨道夫斯基经验公式,可得到各炮孔类型的振速预测公式,预测公式如图3所示。

表2 不同爆破参数下最大峰值振速对应炮孔类型

测试时间	测点编号	最大单孔药量 对应炮孔类型	最大峰值振速 对应炮孔类型
11.11	1	掏槽孔	扩槽孔
	2	掏槽孔	底边孔
	3	掏槽孔	底边孔
11.12	1	掏槽孔	掏槽孔
	2	掏槽孔	底边孔
	3	掏槽孔	底边孔
12.14	1	掏槽孔	掏槽孔
	2	掏槽孔	掏槽孔
	3	掏槽孔	扩槽孔

图3可以看出,此次爆破试验的掏槽孔、扩槽孔、破碎孔、底边孔和周边孔的振速预测公式均具有较高拟合系数,其分别为0.908、0.855、0.889、0.832和0.845。这表明在数码电子雷管爆破施工过程中,利用萨道夫斯基经验公式预测不同类型炮孔振速的方法具有一定的可行性。

基于上述不同类型炮孔的振速预测公式,按照分段式振速预测方法对其拟合公式进行整合,得到的分段式拟合曲线如图4所示。由此可知,此方法的拟合系数为0.785,具有较强的拟合效果。因此,在矿山巷道采用电子雷管爆破施工时,利用分段式质点峰值振速预测方法对爆破振动进行预测是可行性的。

### 5 结论

针对电子雷管爆破不满足传统质点峰值振速预测公式前提假设的问题,本文根据电子雷管爆破施工的特点,将其按炮孔类型的不同进行分类,提出了一种分段式的质点峰值振速预测方法,主要的结论如下:

(1)传统萨道夫斯基经验公式不适用于数码电子雷管爆破的质点峰值振速预测。深井巷道采用数码电子雷管进行爆破时,最大单孔药量对应炮孔类型与振动波形最大峰值振速对应炮孔类型不相同,不满足传统振速预测公式的前提假设。

(2)利用萨道夫斯基经验公式预测不同类型炮孔振速的方法具可行性。基于电子雷管起爆时间将每条数据按照炮孔类型的不同进行分类,利用萨道夫斯基经验公式对其质点峰值振速进行拟合,发现其拟合系数均大于0.8,具有较好的拟合效果。

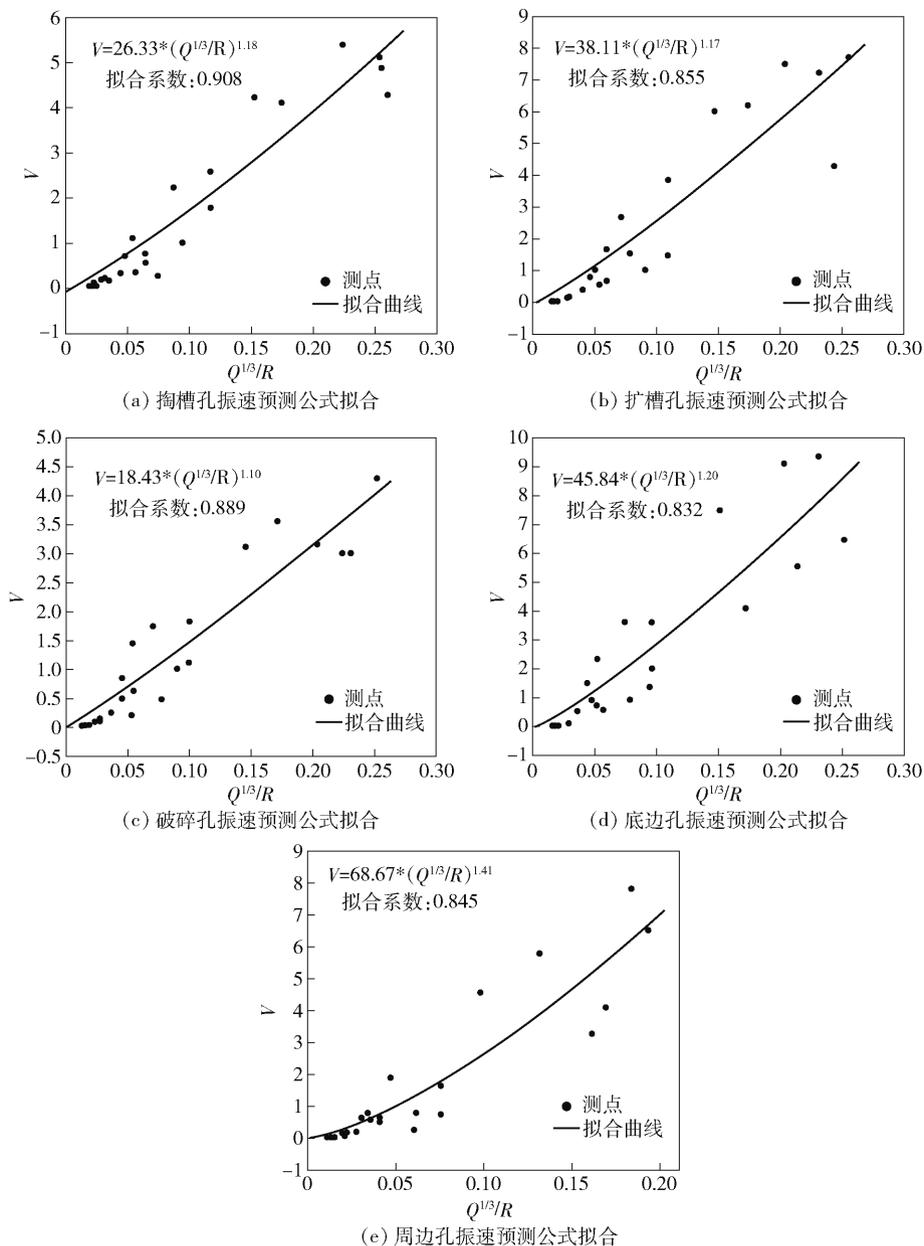


图 3 不同类型炮孔对应的振速预测公式

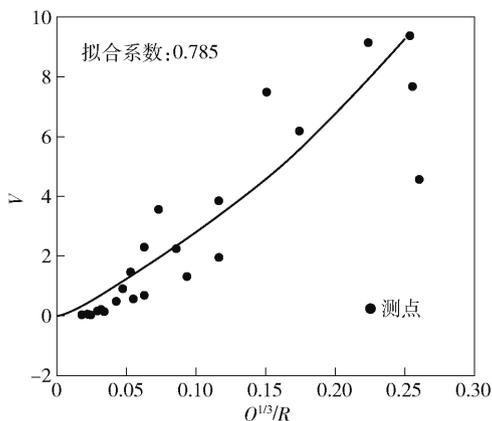


图 4 分段式振速预测方法拟合曲线示意图

(3) 分段式质点峰值振速预测方法适用于数码电子雷管爆破振动预测。以不同类型炮孔的萨氏预测公式为基础,选取各比例距离药量下的预测值最大的部分组成拟合曲线,经试验发现此组合式曲线的拟合系数为 0.785,具有较好的拟合效果。

[参考文献]

[1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 爆破安全规程 GB6722—2003 [S]. 北京:中国标准出版社, 2004.  
 [2] 凌同华. 爆破震动效应及其灾害的主动控制 [D]. 长沙:中南大学, 2004.