

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.04.003

电子起爆条件下雷管布置 对爆破振动频谱的影响研究*

周俊汝¹, 卢文波², 蔡路军¹, 吴亮¹

(1. 武汉科技大学理学院, 武汉 430065; 2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 爆破作为大规模、高效益的破岩方法, 在隧道工程中广泛应用, 但不可避免地给邻近建筑物和围岩带来一些不良影响, 其中以爆破振动为首。电子雷管起爆延时精确、安全可靠, 可以实现对爆破振动强度与频谱的主动控制, 是降低爆破地震效应的有效手段。为探究电子起爆条件下雷管位置和数量对爆破振动频谱的影响, 通过现场试验和数值计算相结合的方法, 归纳总结了起爆点分别位于靠近装药段底部、装药段顶部、装药段中部、装药段顶部底部同时起爆、装药段均匀分布两起爆点同时起爆五种不同起爆条件的爆破振动主频特征; 基于黏弹性介质爆破振动频谱表达式, 从爆源叠加的角度通过分析不同工况中的爆炸荷载特征, 研究了不同起爆点工况下爆破振动的频谱特性, 从机理上揭示了雷管布置对爆破振动频率的影响机制与规律。结果表明: 装药段均匀分布两起爆点同时起爆条件下爆破振动频率最高, 中点起爆和顶部底部同时起爆次之, 顶部、底部单点起爆最低。改变雷管位置或数量实质上是将整个装药段分段同时引爆, 等效为多个子爆源叠加, 分段越多, 子爆源装药长度越短, 爆轰过程缩短, 炸药在孔内的能量释放率提高, 爆炸荷载上升速率越快, 爆破振动频率越高。随着爆心距的增大, 雷管位置对爆破振动频率的影响收敛。研究结论对基于爆破振动频率控制的起爆方案优选具有指导意义, 在隧道开挖等地下工程具有广泛的应用前景。

关键词: 钻孔爆破; 爆破振动; 雷管布置; 振动频率; 爆炸荷载

中图分类号: TD235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)04-0020-07

Influence of Detonator Layout on Frequency Spectrum of Blasting Vibration with Electronic Initiation

ZHOU Jun-ru¹, LU Wen-bo², CAI Lu-jun¹, WU Liang¹

(1. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science,
Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Blasting is widely used in tunnel engineering as a large scale and high efficiency method of rock breakage, but it inevitably brings some bad effects to the adjacent structures and surrounding rocks, among which blasting vibration is the first. Electronic detonator initiation can realize the active control of blasting vibration intensity and spectrum due to its accurate delay, high reliability and safety, which is an effective means to reduce the seismic effect of blasting. In order to explore the influence of the location and number of electronic detonators on the frequency spectrum of blasting vibration, field tests and numerical calculations were combined. The main frequency characteristics of blasting vibration are summarized for five different initiation locations, including the bottom of the

收稿日期 (Date of reception): 2022-08-30

网络首发日期 (Published online): 2023-04-07

作者简介: 周俊汝 (1990-), 女, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事工程爆破方面的科研工作, (E-mail) zhjr@whu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51909196)

About the author: ZHOU Jun-ru (1990-), female, Ph. D, Associate professor, master's supervisor, mainly engaged in research and practice of engineering blasting and rock mechanics, (E-mail) zhjr@whu.edu.cn.

Fund Programs: Chinese National Natural Science Foundation (51909196)

charge, the top of the charge, the middle of the charge, simultaneous initiation at the top and bottom of the charge, and simultaneous initiation at two points evenly distributed in the charge section. Based on the spectrum expression of blasting vibration in viscoelastic medium, the characteristics of blasting loads under different working conditions were analyzed from the perspective of superposition of blasting sources, which was used to reveal the influence of detonator arrangement on blasting vibration frequency spectrum. The results show that the initiation conditions are ranked as simultaneous initiation of two uniformly distributed points, middle initiation, simultaneous initiation at the top and bottom, top initiation and bottom initiation, in the order of vibration frequency from largest to smallest. Multiple detonators actually divide the whole charge into several segments, which is equivalent to superposition of multiple sub-explosive sources. Changing the location or number of detonators is essentially to detonate the entire charge in segments at the same time. The more segments, the length of sub-explosive source charge and the detonation process are shorter, which means the energy release rate of explosives and the blasting vibration frequency are higher, and the rise of explosion load is faster. In addition, with the increase of distance to blast source, the influence of detonator position on blasting vibration frequency converges.

Key words: drilling and blasting; blasting vibration; layout of detonator; vibration frequency; blasting load

钻孔爆破是水利水电工程建设、矿产资源开采等领域最常用的大规模、高效益的破岩方法,却不可避免伴随一些负面效应^[1-3],其中以爆破振动为首,是工程设计者和管理者最为关注的爆破安全问题。爆破地震波传播诱发的爆破振动通常利用振动强度、主频和持续时间三个要素描述其特性^[4]。工程实践中有资料记载,中远区振速低于安全允许标准时仍有出现低频振动失稳的情况,这说明爆破振动频率对于控制和评价爆破振动危害非常重要。

钻孔爆破中爆轰速度有限,沿条形药包轴线方向不可避免存在时间和方向效应^[5],对爆炸荷载的作用过程有显著影响。起爆点位置决定条形药包爆轰波传爆方向及应力波的传播方向,对爆炸能量分配和应力场特征都有影响^[6-12],能量转化存在差异,引起爆破振动场的时空分布特征不同,具体表现在振速峰值与特征频率上。因此起爆点位置引起诸多学者的关注,高启栋等利用有限元数值模拟和爆破试验相结合的方法得出起爆点位置对传至围岩的爆炸能量分布起着重要作用^[13],爆炸能量优先传递到爆轰波的同方向,较于反向起爆,正向起爆起爆有利于支护结构的保护,但掏槽效果不佳;Trivino等发现从爆轰波正向和反向测得信号的幅值和频谱有显著差异^[14];冷振东等利用3DEC离散元软件模拟不同起爆位置下台阶爆破的爆堆形态^[15],指出不能将爆炸荷载简单地考虑为瞬态爆轰,起爆位置决定爆轰方向,影响鼓包最先运动的位置;刘科伟等发现应变波峰值随量规位置变化的根本原因是起爆方向^[16]。朱强等利用LS-DYNA比较了正向反向两种起爆方式^[17],得出反向起爆可以减少孔底岩体的最大损伤深度和体积。当前,就起爆点位置而言,研究

的领域主要集中在端点起爆导致炮孔周围应力场和能量场分布不均上,但是起爆方式对中远区域的爆破振动场有较少的研究,起爆位置对爆破振动频率的影响机制与规律还未可知。

通过现场爆破试验得知电子起爆中雷管的布置对爆破振动频率具有一定程度的影响,然后利用ANSYS/LS-DANA数值模拟方法,更系统地研究雷管起爆位置和数量对爆破振动频率的作用规律,并从爆源叠加角度,通过分析不同工况中的爆炸荷载特征,探究雷管布置通过改变爆轰传爆方向,进而对爆破振动频率的影响机理。

1 丰宁抽水蓄能电站单孔爆破试验

1.1 工程背景与试验方案

丰宁抽水蓄能电站位于河北省丰宁满族自治县,装机容量3600 MW,分两期工程开发建设。为论证二期工程地下洞室爆破开挖施工对一期工程的影响,结合现场施工条件,在二期地下厂房探洞底板合适部位进行了爆破试验。见图1。

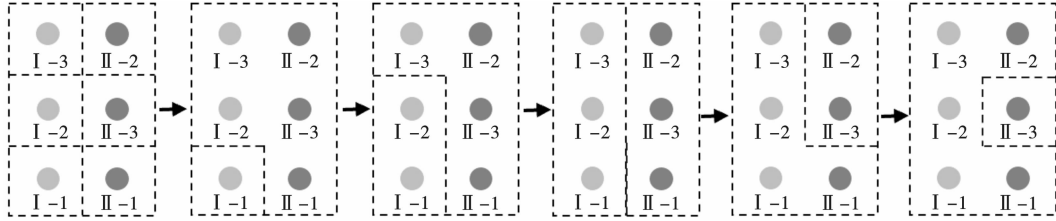


图1 爆破试验探洞

Fig. 1 Exploration tunnel of blasting test

本次爆破试验分两排钻设了6个竖直浅孔,孔深3 m,堵塞0.9 m,孔径42 mm,药径32 mm。第一排的三个孔采用中点起爆,第二排孔采用孔底起爆。这里,为排除自由面对爆破振动频率的影响,将II-1

号孔作为参照孔,I-3号作为试验孔,两孔除雷管布置外其余爆破参数和边界条件完全相同(见图2)。炮孔布置、装药结构与雷管布置如图3所示。



I-1:一个自由面; I-2:两个自由面; I-3:两个自由面;
II-1:两个自由面; II-2:三个自由面; II-3:四个自由面

图2 逐孔起爆过程中各孔的临空面示意图

Fig. 2 The schematic diagram of the free face of each hole in the process of hole-by-hole initiation

试验中地板上沿探洞纵向中轴线布置6个振动监测点,如图3所示。测试系统采用三维速度传感器,记录仪器为TC-4850爆破振动智能监测仪,其监测振速范围为0.001~35.4 cm/s,振动频率在1~500 Hz。

1.2 现场试验结果分析

对采集的振动信号进行频谱分析,获得爆破振动特征频率,由于主频在爆破地震波传播过程中的

衰减有突变或波动^[18],这里特征频率除主频外,另选用质心频率表示幅值谱在频域内分布规律,质心频率的定义为^[14]

$$f_c = \frac{\sum_{i=1}^n A_i f_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (1)$$

式中: f_c 为质心频率; A_i 为频率 f_i 所对应的振动速度谱幅值。

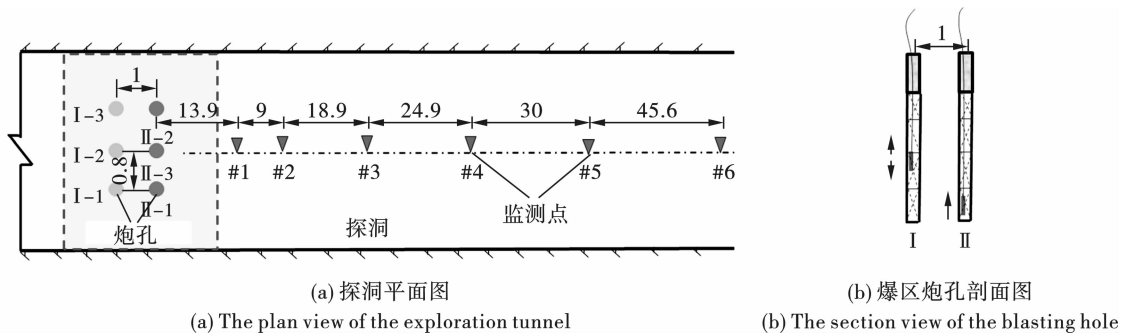


图3 爆破试验设计示意图(单位:m)

Fig. 3 Schematic diagram of blasting test design(unit:m)

本次试验的实测爆破振动信号显示,无论是水平径向、水平切向还是竖直向,主频随爆心距的增大出现较大的波动,衰减规律呈现较大离散性,但可以看出中点起爆振动主频是高于孔底起爆振动主频;质心频率呈现较好的衰减规律,且与雷管布置有较好的相关性。为量化比较雷管布置对爆破振动频率的影响,这里定义频率全局增量来描述其他雷管布置方案相较于底部起爆对频率的影响。

$$GFIN = \frac{\int (f - f_{bottom}) dr}{\int f_{bottom} dr} \quad (2)$$

式中: $GFIN$ 是频率全局增量; f 是其他雷管布

置方案的质心频率; f_{bottom} 是底部起爆的质心频率; r 是爆心距。

图4显示了中点起爆I-3号孔和底部起爆II-1号孔两种工况对应的爆破振动频率的衰减规律,中点起爆的爆破振动频率衰减曲线基本位于孔底起爆频率衰减曲线的上方,这说明中点起爆对应的爆破振动频率在全局上要高于孔底起爆对应的爆破振动频率。与孔底起爆相比,中点起爆爆破振动频率的全局增量 $GFIN$ 在水平径向、水平切向和竖直向三个方向上分别为1.98%、12.67%和5.01%。

丰宁现场试验实测数据表明起爆位置对爆破振动频率确有一定程度的影响,但对于孔深3 m的两

个孔影响不大。对比孔底起爆, 中点起爆将起爆点移动到装药段的中点位置, 实际上该起爆点同时引爆了上下两部分装药段。

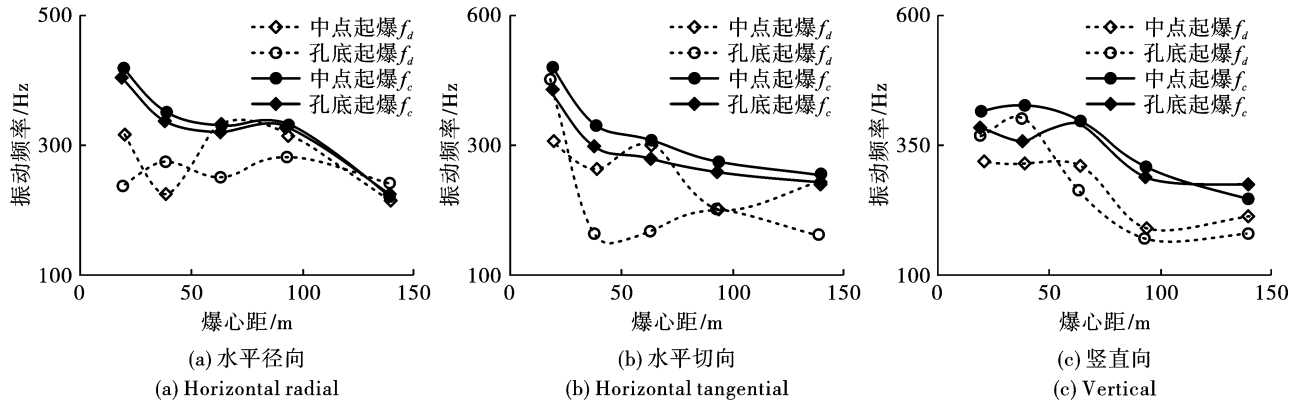


图 4 I-3 和 II-1 号两孔爆破振动特征频率

Fig. 4 The eigenfrequency of blasting vibration of I-3 and II-1

2 不同雷管布置的单孔爆破数值计算

由于爆破试验数据有限, 且受地质与周围环境影响较大, 试验结果呈现出离散性。这里采用有限元 ANSYS/LS-DANA 软件建立三维有限元单孔爆破模型, 在炮孔几何参数与炸药参数不变的情况下, 分析不同起爆点位置与数量对爆破振动频率的影响规律。

2.1 计算模型与参数

考虑对称性, 建立四分之一单孔爆破模型, 岩体模型尺寸为 32 m × 32 m × 8 m, 孔深 3 m, 其中装药长度为 2.1 m, 堵塞段 0.9 m, 孔径 42 mm, 药径 32 mm, 下部保留岩体厚度为 5 m。在岩体模型的对称边界上施加对称约束, 计算过程中除地表为临空面外, 其余方向均施加无反射边界以模拟半无限岩体。数值计算模型及测点布置如图 5 所示。

计算中炸药采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 材料模型, 结合 JWL 状态方程计算炸药爆炸过程中压力与体积的关系, 表达式如下

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (3)$$

式中: P 为 JWL 状态方程决定的爆轰产物的压

力; V 为相对体积; 为初始比内能; A, B, R_1, R_2 和 ω 均为描述 JWL 方程的独立常数。见表 1。

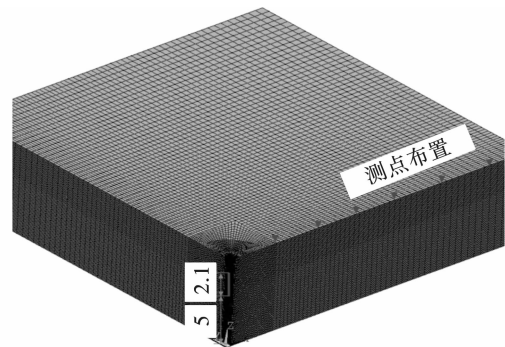


图 5 有限元数值模型

Fig. 5 Finite element numerical model

岩体采用 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 材料模型, 参数列于表 2。

柱状药包采用空气不耦合装药结构, 模型中空气采用 MAT_NULL 材料模型, 同时结合下式的多线性方程描述空气的作用

$$P = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) e \quad (4)$$

式中: $C_0 = C_1 = C_2 = C_3 = C_6 = 0$; $C_4 = C_5 = 0.4$; $\mu = \rho/\rho_0$, ρ, ρ_0 分别为初始与当前的材料密度。

表 1 炸药计算参数

Table 1 Calculation parameters of explosives

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1050	3850	209.7	3.5	5.8	1.29	0.35

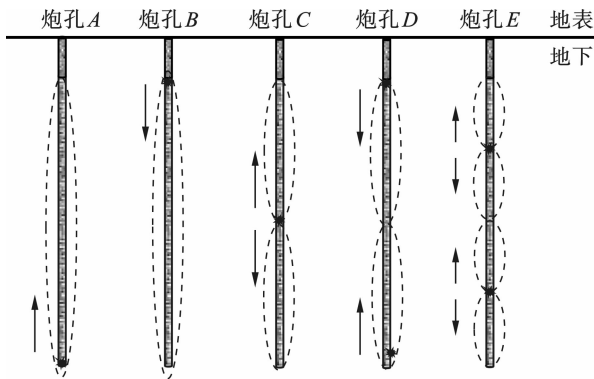
表 2 岩体计算参数

Table 2 Calculation parameters of rock mass

密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	杨氏模量/GPa	泊松比 ν	屈服强度/MPa	切线模量/GPa
2750	60.5	0.22	70	36.2

2.2 数值计算结果分析

对同一个有限元模型,根据雷管布置设置5种雷管布置工况:孔底起爆(雷管布置于药卷底部)、孔口起爆(雷管置于药卷顶部)、中点起爆(雷管置于药卷轴向长度的中点位置)、孔口孔底同时起爆(两雷管分别置于药卷顶部和底部)和两点起爆(两雷管分别置于二等分炸药段的中点位置),如图6所示。



图例说明: 炮孔A-孔底起爆, 炮孔B-孔口起爆,
炮孔C-中点起爆, 炮孔D-孔底孔口起爆,
炮孔E-两点起爆

炮孔A-孔底起爆, 炮孔B-孔口起爆, 炮孔C-中点起爆,
炮孔D-孔底孔口起爆, 炮孔E-两点起爆

图6 五种雷管布置方案示意图

Fig. 6 Schematic diagram of five detonation methods

五种工况中,监测点均选取在地表临空面的相同位置,采集监测点的振动信号,通过傅里叶变换得

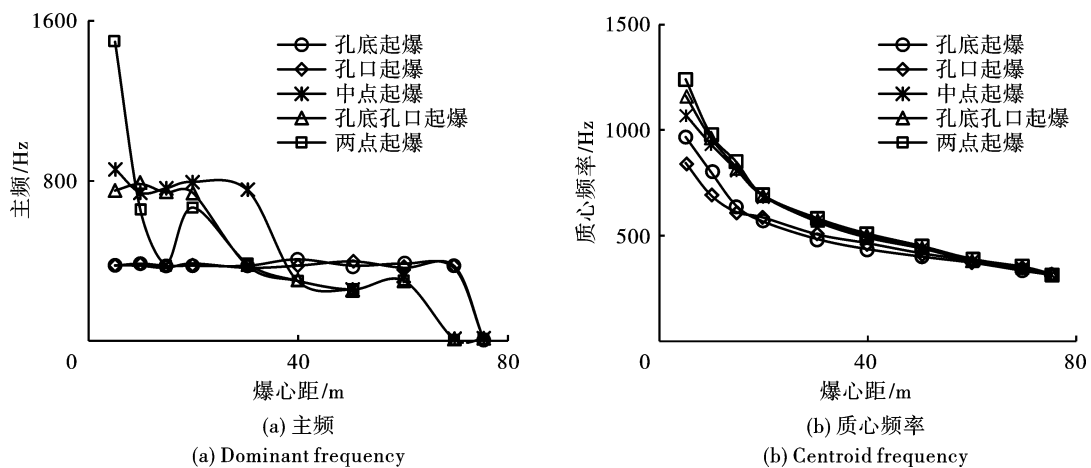


图7 五种雷管布置工况下爆破振动主频 f_d 及质心频率 f_c 的衰减

Fig. 7 Attenuation of blasting vibration main frequency f_d and centroid frequency f_c under five detonation modes

3 雷管布置对振动频率的影响机理

本节从爆源叠加角度,通过分析不同工况中的

到幅值谱曲线。水平径向爆破振动信号为例,图7为五种雷管布置工况下爆破振动主频和质心频率随爆心距的衰减过程,由图7可知,主频随爆心距的衰减中有突变和波动,而质心频率衰减规律更平稳。以孔底起爆为参照,利用式(2)计算孔口、中点、孔口孔底同时起爆以及两点起爆的爆破振动频率全局增量,结果列于表3。

表3 不同雷管布置工况下爆破振动频率全局增量 GFIN
Table 3 Global increment GFIN of blasting vibration frequency under different detonation modes

雷管布置	孔口	中点	孔口孔底	两点
GFIN/%	-0.94	28.90	31.10	40.20

孔口起爆爆破振动频率衰减曲线和孔底起爆的频率衰减曲线近似重合,孔口起爆的频率全局增量 GFIN 非常小,由此可知这两种雷管布置工况对距爆源中远区的爆破振动频率影响差别较小。同样地,中点起爆和孔口孔底同时起爆的 GFIN 大小相近,且两种工况的衰减曲线近似重合,表明这两种雷管布置工况下激发爆破振动的特征频率近似相同。综合设定的五种雷管布置工况中,两点起爆的振动频率是最高的,其次是中点起爆和孔口孔底同时起爆,频率最低的为孔底起爆和孔口起爆。数值计算结果进一步证实了不同雷管布置工况下,产生的爆破振动效应不同。

爆炸荷载特征,讨论雷管布置对爆破振动频率的影响机理。

3.1 雷管布置产生的爆源叠加效应

如图 6 所示, 无论是孔底起爆还是孔口起爆的单个起爆方式, 这两种工况中起爆点引爆的是整个装药段长度 L_c , 爆破振动频率近似相同。中点起爆的起爆点将整个装药段等分上下两段, 上下均分的两段炸药同时被引爆; 孔口孔底同时起爆中两个起爆点同样是将炸药等分为两段, 说明这两种工况都等效为两个同时被引爆的装药长度为 $L_c/2$ 的子爆源叠加, 中点起爆与孔口孔底同时起爆的爆破振动频率近似相等。两点起爆中, 每个起爆点位于二等分炸药段的中点位置, 两个起爆点同时引爆的装药段长度为总装药段长度的 $1/4$, 等效为四个同时起爆的装药长度为 $L_c/4$ 的子爆源叠加。

因此, 雷管布置对爆破振动频率的影响规律, 实质是利用起爆点将炸药分为多段同时引爆, 等效为多个同时被引爆的子爆源叠加。子爆源装药长度取决于起爆点位置与数量, 分段越多, 子爆源装药段长度越小, 爆源激发振动频率越高; 起爆点位置和数目不同, 但其控制的子爆源装药段长度一致时, 振动频率近似相等。

3.2 雷管布置对爆炸荷载的影响

基于黏弹性介质中爆破振动速度幅值谱(式 5), 研究雷管布置对爆破振动频率的影响规律, 已知爆源几何参数、传播介质性质完全相同, 仅雷管布置决定的爆炸荷载作用过程不同。爆炸荷载主要参数为荷载峰值、荷载上升时间和作用持续时间, 其中影响荷载谱的是荷载上升时间^[18,19]。

$$F_n(\omega) = \frac{\exp\left(-\frac{\omega r}{2Q_r C_p}\right) \left| S_\sigma(j\omega) \right| r_e C_p \omega \sqrt{C_p^2 + r^2 \omega^2} / 4\mu^2}{\sqrt{x+y}} \quad (5a)$$

其中

$$x = (C_p/r_e)^4 + [1 - (\lambda + 2\mu)/(2\mu)] (C_p/r_e)^2 \omega^2 \quad (5b)$$

$$y = [(\lambda + 2\mu)/(4\mu)]^2 \omega^4 \quad (5c)$$

式中: λ, μ 为拉梅系数; C_p 为纵波速度; ν 为泊松比; Q_r 为岩石的地质品质因子; r_e 为弹性空腔半径; $S_\sigma(j\omega)$ 为弹性空腔内的荷载谱; ω 为角频率; r 为爆心距。荷载上升时间越短、上升速率越快, 荷载谱中高频对应幅值比例增加, 从而影响到爆破振动频谱幅值整体向高频带方向偏移, 爆破振动幅值谱中高频对应幅值比例越大。

如图 8 所示, 在数值计算的模型中沿着炮孔轴向在孔壁上布测点监测爆炸荷载作用过程, 获得各测点在不同雷管布置下的荷载上升时间与上升速率, 见图 9。

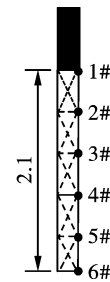


图 8 炮孔壁荷载监测点(单位:m)
Fig. 8 Load monitoring points on the wall of the blast hole(unit:m)

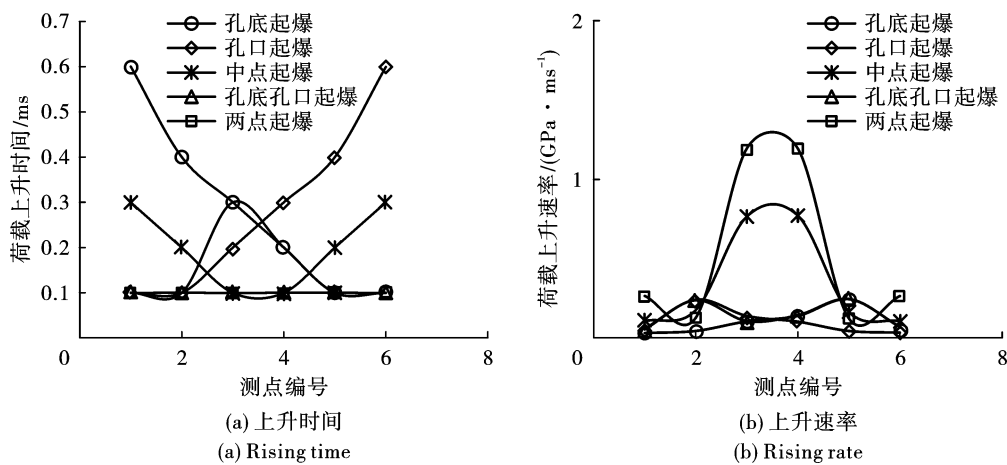


图 9 不同雷管布置工况下各测点的压力上升过程

Fig. 9 Pressure rise process of each measuring point under different detonation modes

由图 9 可知, 两点起爆的荷载上升时间最短, 上升速率最快, 荷载谱高频成分增加, 爆破振动频率最

大。中点起爆和孔口孔底同时起爆的荷载上升时间和上升速率其次,因此爆破振动频率次于两点起爆;孔底起爆和孔口起爆的荷载上升时间最长,荷载上升速率最慢,爆破振动频率最小,两者荷载上升过程的爆轰压力在空间上沿炮孔轴向传播方向相反,但在时间特征上相似,因此孔口、孔底单点起爆激发的振动频率近似相等。

4 结论

通过现场试验和数值模拟相结合的方法,研究雷管布置对爆破振动频率的影响机制和作用规律,可以得出以下结论:

(1) 两点起爆的爆破振动频率最高;中点起爆和孔口孔底同时起爆的振动频率近似相等,次于两点起爆的振动频率;孔底、孔口单点起爆的爆破振动频率最低。

(2) 改变雷管位置或者增加起爆点数量实质上是整个装药段分段同时引爆,等效为多个子爆源叠加,分段越多,子爆源的装药长度越小,激发爆破振动频率越高。

(3) 缩短子爆源的装药段长度,可压缩孔内爆轰波传播过程,加快爆炸荷载上升速率,进而增加了荷载谱高频成分,爆破振动频率提高。

(4) 随着爆心距的增大,雷管布置对爆破振动频率的影响减弱,当爆心距达到一定值时,雷管布置方案对频率不再有影响。

电子起爆条件下雷管布置对爆破振动频率的影响研究对起爆方案的设计起到一定的指导作用。在实际工程施工中,应根据破岩效果和振动控制的侧重点不同,选择合适的起爆方案。

参考文献 (References)

- [1] 胡帅伟,陈士海. 爆破振动下围岩支护锚杆动力响应解析[J]. 岩土力学,2019,40(1):281-287.
- [1] HU S, CHEN S H. Analytical solution of dynamic response of rock bolt under blasting vibration[J]. Rock and Soil Mechanics,2019,40(1): 281-287. (in Chinese)
- [2] 费鸿祿,王振达,蒋安俊,等. 地铁隧道爆破振动对地面的影响规律研究[J]. 爆破,2018,35(3):68-73.
- [2] FEI H L, WANG Z D, JIANG A J, et al. Study on influence of blasting vibration on ground of metro tunnel[J]. Blasting,2018,35(3): 68-73. (in Chinese)
- [3] MOVAHEDI M, KOKABI A H, REIHANI S M S, et al. Prediction and optimization of back-break and rock fragmentation using an artificial neural network and a bee colony algorithm[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment,2016,5(1):27-36.
- [4] LU W B, LUO Y, CHEN M, et al. An introduction to Chinese safety regulations for blasting vibration[J]. Environmental Earth Sciences,2012,67(7):1951-1959.
- [5] C Knock, N Davies. Blast waves from cylindrical charges[J]. Shock Waves,2013,23(4):337-343.
- [6] LENG Zhen-dong, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Explosion energy transmission under side initiation and its effect on rock fragmentation[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2016,86:245-254.
- [7] 王林桂,孙鹏昌,沙 广,等. 基于孔内起爆位置调整的台阶爆破根底控制方法探讨[J]. 水电与新能源,2019,2(33):5-8.
- [7] WANG L G, SUN P C, SHA G. On the control of toe rocks in bench blasting based on detonator position adjustment in blast holes [J]. Hydropower and New Energy, 2019, 2(33):5-8. (in Chinese)
- [8] LONG Y, ZHONG M, XIE Q, et al. Influence of initiation point position on fragmentation by blasting in iron ore[C] //Fragblast 10,2013,111-116.
- [9] 张宝平,张庆明,黄风雷. 爆轰物理学[M]. 北京:兵器工业出版社,2001.
- [10] 吴 超,周传波,路世伟,等. 柱状装药不同起爆方式的数值模拟研究[J]. 爆破,2016,33(2):74-77,91.
- [10] WU C, ZHOU C B, LU S W, et al. Numerical simulation on cylindrical charged explosives with different initiation [J]. Blasting,2016,33(2): 74-77,91. (in Chinese)
- [11] 向文飞,舒大强,朱传云. 起爆方式对条形药包爆炸应力场的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(9):1624-1628.
- [11] XIANG W F, SHU D Q, ZHU C Y. Impacts of detonating mode on blast stress field of linear explosive charge[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(9): 1624-1628. (in Chinese)
- [12] 龚 敏,黎剑华. 延长药包不同位置起爆时的应力场[J]. 北京科技大学学报,2002,24(3):248-253.
- [12] GONG M, LI J H. A research on stress field of column and strip-shaped charge in different detonated points [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2002,24(3): 248-253. (in Chinese)
- [13] 高启栋,卢文波,冷振东,等. 隧洞开挖过程中掏槽孔起爆位置的优选[J]. 振动与冲击,2018,37(9):8-16.
- [13] GAO Q D, LU W B, LENG Z D, et al. Optimization of cut-hole's detonating position in tunnel excavation[J]. Journal of Vibration and Shock,2018,37(9): 8-16. (in Chinese)

- and Soil Mechanics, 2010, 31 (3): 993-997. (in Chinese)
- [16] ZHU B, JIANG N, ZHOU C, et al. Dynamic failure behavior of buried cast iron gas pipeline with local external corrosion subjected to blasting vibration [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2021, 88: 103803.
- [17] 张玉琦, 蒋楠, 贾永胜, 等. 运营充水状态高密度聚乙烯管的爆破振动响应特性 [J]. 浙江大学学报 (工学版), 2020, 54(11): 2120-2127, 2137.
- [17] ZHANG Yv-qi, JIANG Nan, JIA Yong-sheng, et al. Blasting vibration response characteristics of high density polyethylene pipe under water filling in operation [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(11): 2120-2127, 2137. (in Chinese)
- [18] 刘志波. 莲花山隧道爆破振动效应试验研究 [J]. 爆破, 2020, 37(3): 78-84.
- [18] LIU Zhi-bo. Experimental study on blasting vibration effect of lian hua shan tunnel [J]. Blasting, 2020, 37(3): 78-84. (in Chinese)
- [19] 程跃辉, 江鸿, 陈伟. 隧道下穿匝道爆破振动控制技术及其效果分析 [J]. 爆破, 2017, 34(3): 63-67.
- [19] CHEN Yue-hui, JIANG Hong, CHEN Wei. Blasting vibration control technology and effect analysis of tunnel undercrossing ramp [J]. Blasting, 2017, 34(3): 63-67. (in Chinese)
- [20] YU J, LIU S Y, TONG L Y. Hollow effect induce by blasting vibration in shallow tunnels [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2010, 40(1): 176-179.
- [21] 杨云凌. 浅埋隧道爆破振动空洞效应研究 [J]. 爆破, 2012, 29(3): 127-130.
- [21] YANG Yun-ling. Study on cavity effect of blasting vibration in shallow tunnel [J]. Blasting, 2012, 29(3): 127-130. (in Chinese)
- [22] DING W, JIA B, LIU D, et al. Hollow effect of ground vibration induced by electronic detonator in shallow tunnel [J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 1-13.
- [23] XIA X, LI H, LIU Y, et al. A case study on the cavity effect of a water tunnel on the ground vibrations induced by excavating blasts [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 292-297.

英文编辑: 陈东方

(上接第 26 页)

- [14] L F Trivino, B Mohanty, B Milkereit. Seismic waveforms from explosive sources located in boreholes and initiated in different directions [J]. Journal of Applied Geophysics, 2012, 87: 81-93.
- [15] 冷振东, 刘亮, 周旺潇, 等. 起爆位置对台阶爆破爆堆形态影响的离散元分析 [J]. 爆破, 2018, 35(2): 50-55, 100.
- [15] LENG Z D, LIU L, ZHOU W X, et al. Numerical investigation of initiation points on muckpile profile in bench blasting [J]. Blasting, 2018, 35(2): 50-55, 100. (in Chinese)
- [16] LIU K, LI X, LI X, et al. Characteristics and mechanisms of strain waves generated in rock by cylindrical explosive charges [J]. Journal of Central South University, 2016, 23(11): 2951-2957.
- [17] 朱强, 陈明, 郑炳旭, 等. 空气间隔装药预裂爆破岩体损伤分布特征及控制技术 [J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 2758-2765.
- [17] ZHU Q, CHEN M, ZHENG B X, et al. Distribution and control technology of rock damage induced by air-deck charge presplitting blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 2758-2765. (in Chinese)
- [18] 周俊汝, 卢文波, 张乐, 等. 爆破地震波传播过程的振动频率衰减规律研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2171-2178.
- [18] ZHOU J R, LU W B, ZHANG L, et al. Attenuation of vibration frequency during propagation of blasting seismic wave [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2171-2178. (in Chinese)
- [19] 闫鸿浩, 赵碧波, 李晓杰. 改良型中深孔爆破振动频率研究 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(12): 93-98.
- [19] YAN H H, ZHAO B B, LI X J. The study of blasting vibration frequency on modified middle-deep hole [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(12): 93-98. (in Chinese)

英文编辑: 陈东方