

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.012

双孔台阶延期爆破效应的数值模拟研究*

杨靖宇, 杨军, 荣凯

(北京理工大学爆炸科学与技术重点实验室, 北京 100081)

摘要: 为了研究孔间延期对台阶爆破效果的影响, 基于 ABAQUS 进行双孔双坡面台阶精确延时爆破的数值模拟研究, 分析不同延时爆破条件下双孔台阶结构的应力波传播规律、拉伸与压缩损伤发展和振动效应。结果表明: 越接近于自由表面, 岩体中的质点应力峰值和振速峰值越大, 损伤区域越明显; 在台阶顶面, 随着爆心距的增加, 各测点 Y 向(水平)振速峰值呈现出先减小后增加之后再减小的趋势, 同时最大 Y 向(水平)振速测点位于 150 mm(1.25 倍孔距)处, Z 向(竖直)振速峰值随爆心距的增加逐渐减小; 随着孔间延时的增加, 岩体损伤单元体积($D > 0.6$)在小范围内降低后不断增大, 并于孔间延时为 60 μs 时达到峰值, 且随着延时的进一步增加, 损伤体积逐渐降低并趋于稳定值; 同时, 岩石内两孔间测点应力在孔间延时为 60 μs 时达到峰值, 台阶顶面处振动效应逐渐降低并于 50 μs 时趋于稳定; 孔间延时为 60 μs , 也即是 0.5 ms/m(孔间延时与孔距比值)为本模型最佳爆破孔间延时。

关键词: 台阶爆破; 精确延时; 数值仿真; 岩石损伤; 振动效应

中图分类号: TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)03-0067-08

Numerical Simulation Research on Delayed Double-hole Bench Blasting Effect

YANG Jing-yu, YANG Jun, RONG Kai

(Beijing Institute of Technology Key Laboratory of Explosion
Science and Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the influence of delay time on bench blasting, a numerical simulation study on precise delay blasting of a double-hole and double-slope bench was carried out by ABAQUS. The main contents of the research include the stress wave propagation law, the development of tensile and compression damage and the vibration effects of the double-hole bench structure with different delays. The results show that the closer to the free surface, the greater the peak stress and peak particle vibration velocity in the rock mass, and the more obvious the damage area. Meanwhile, on the top surface of the bench, with the increase of distance to blast source, the peak particle vibration velocity in Y direction (horizontal) at each measuring point showed a decreasing increasing-decreasing trend. At the same time, the measuring point with the maximum Y direction (horizontal) velocity is located at 150 mm (1.25 times the hole spacing). The peak particle velocity of the Z -direction (vertical) decreases gradually with the increase of distance to blasting source. Besides, with the increase of time delay between holes, the volume of rock damage unit ($D > 0.6$) decreases in a small range and then increases continuously. When the delay time is 60 μs , the vibration velocity reaches the peak value. With the further increase of delay, the damage volume decreases gradually and tends to a stable value. At the same time, the stress of the measuring point between two holes in the rock reaches the peak value when the delay time between the holes is 60 μs , and the vibration velocity at the top of the bench gradually decreases and tends to be stable at 50 μs . Therefore, it can be considered that 60 μs (0.5 ms/m) is the best delay time for this model.

Key words: bench blasting; precision delay; numerical simulation; rock damage; vibration effect

与同时起爆相比,延时起爆可以更加高效地利用炸药能量,减小炸药单耗,改善爆破效果。随着数码电子雷管和逐孔起爆技术在露天矿开采工程中的广泛应用,选择合适的延时间隔以达到工程目的俨然成为爆破技术研究的热点问题^[1]。

关于孔间延时起爆对岩体内物理现象的影响机制,学界内存在着多种定性推断和理论假说。陈士海等指出^[2],先爆破药包在岩体间形成的缝隙为后续药包产生的应力波提供了新的自由面,使得岩体在卸载时的拉应力作用下形成二次破碎,此时起爆后爆药包的爆破效果最佳。Shia 等指出岩体的位移时间与最小抵抗线的长度存在函数关系^[3],并总结出岩块位移时间为应力波传播至自由面时间的5~10倍;楼晓明等认为先爆药包应力波传到后爆药包,在应力波作用的同时起爆后爆药包^[4],此时两者振动波存在时差以及速度差,破裂岩块会相遇并激烈碰撞,使岩块充分破坏。

随着计算机技术的不断发展,众多学者将动力有限元软件模拟分析引入到双孔延时爆破的研究中。Schill 和 Sjöberg 运用 LS-DYNA 有限元软件研究了延迟时间对双孔模型爆破效应的影响^[5],认为孔间存在局部相互作用的应力波效应。苏波等利用数值仿真手段研究了双孔不同延时间隔下爆破振动波形的相互叠加作用^[6]。李顺波等对不同延时起爆时岩石的破碎程度进行了数值仿真研究^[7],认为当起爆延时与最小抵抗线为2 ms/m时,岩体的爆破效果最佳。Yi 等对相邻钻孔不同延时起爆条件下岩体损伤和岩块大小进行了分析和数值研究^[8]。目前,台阶精确延时爆破研究的主要内容是岩石的裂纹扩展和损伤破坏形态,对于岩体内冲击波传播规律和台阶表面振动效应的研究较少^[9]。

同时,多数学者在进行台阶爆破研究时,将岩体结构近似为正方体,而在工程实际中,由于台阶坡面角的存在,单个炮孔爆破的岩石破碎体并不是正立方体,而是与台阶坡度相关的斜立方体^[10]。基于此,采用数值模拟方法研究双炮孔双坡面台阶结构同时爆破和精确延时爆破时内部应力和损伤分布规律及岩体的爆破振动效应,并确定该模型最佳孔间延时,为改善台阶爆破质量提供参考依据。

1 有限元模型

1.1 计算模型

根据文献[11]中的室内爆破试验模型,建立数值仿真模型(见图1)。模型整体尺寸为677.06 mm × 509.2 mm × 400 mm,炮孔深240 mm(超深40 mm),堵塞长度为100 mm,炮孔直径为5 mm。测点主要分布于两炮孔轴线截面和台阶面。为了真实模拟露天矿台阶爆破环境,将模型的上边界、前边界和左边界设置为自由面,在图示不可见的边界设置一层无限单元(CIN3D8),实现无反射边界条件。采用国际通用单位制,总共划分22.3万个单元。

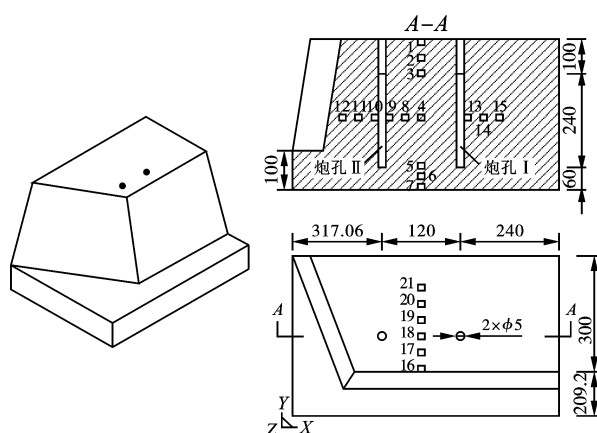


图1 模型尺寸和测点分布(单位:mm)

Fig. 1 Bench structure and distribution of measuring nodes (unit: mm)

设定右侧炮孔为炮孔 I,左侧为炮孔 II,本研究设置的精确延时爆破工况均为左侧炮孔 II 先行起爆,两药柱起爆点为底部几何中心。最终模型结构包括三部分:炸药,双孔台阶和堵塞。

1.2 材料参数

利用 ABAQUS 模拟精确延时爆破的过程,选择适宜的爆炸载荷加载方式对于数值模拟的准确性是至关重要的。真实的矿场爆破过程是一个爆轰波在药柱内传播的过程,而应力—时间曲线的加载方式很难精确反映这一过程,于是采用流固耦合的方式加载爆炸载荷。采用 JWL 状态方程反映爆轰过程中爆轰产物压力、体积和能量的变化规律。本研究采用乳化炸药,JWL 方程和炸药参数如式1和表1。

表1 炸药材料参数^[10]

Table 1 Properties of explosive

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	E_0
1000	4000	200	0.18	4.2	0.9	0.15	0

收稿日期:2021-04-28

作者简介:杨靖宇(1997-),男,硕士研究生,从事爆破方面数值模拟研究,(E-mail)3120190297@bit.edu.cn。

通讯作者:杨军(1960-),男,教授,从事工程爆破与安全方面的研究,(E-mail)yangj@bit.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774043)

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

式中: P 为爆轰压力; V 为相对体积; E_0 为初始内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为炸药材料常数。

研究主要关注双孔台阶结构岩石在爆炸作用下的动态力学响应, 为了简化问题, 假设岩体是无缺陷的均匀介质, 故数值仿真中岩石的本构采用塑性损

伤模型 (Damaged Plasticity), CDP 材料模型基于塑性来描述连续介质的损伤性质, 在受压屈服时材料先硬化后软化, 受拉屈服时材料直接表现为软化, 并通过塑性应变来定义损伤变量^[12]。CDP 材料模型能够很好的反映岩石在动态加载下的结构力学响应及损伤情况^[13,14]。岩石材料 CDP 模型参数如表 2、表 3 所示^[10]。

表 2 CDP 材料模型参数
Table 2 Properties of CDP model

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性 模量/Pa	泊松比	膨胀角/ $^\circ$	偏心率	f_{00}/f_{c0}	K	粘性参数
2400	2.06e10	0.167	15	0.1	1.16	0.6667	0

表 3 岩石单轴应力应变参数及损伤因子

Table 3 Rock stress-strain parameters and damage factors

抗压强度/ MPa	非弹性 应变	损伤 因子	抗拉强度/ MPa	开裂 应变	损伤 因子
24.0	0	0	1.78	0	0
29.2	0.0004	0.1299	1.46	0.0001	0.30
31.7	0.0008	0.2429	1.11	0.0003	0.55
32.4	0.0012	0.3412	0.96	0.0004	0.70
31.8	0.0016	0.4267	0.80	0.0005	0.80
30.4	0.0020	0.5012	0.54	0.0008	0.90
28.5	0.0024	0.5660	0.36	0.0010	0.93
21.9	0.0036	0.7140	0.16	0.0020	0.95
14.9	0.0050	0.8243	0.07	0.0030	0.97
2.95	0.0100	0.9691	0.04	0.0050	0.99

衰减, 炮孔间的损伤区域进一步贯通并且渐渐稳定。

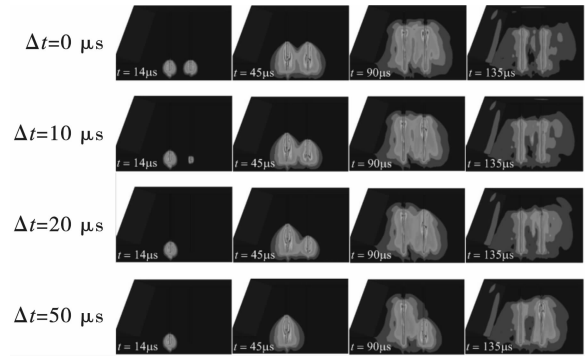


图 2 Mises 等效应力云图

Fig. 2 Mises Equivalent stress nephogram

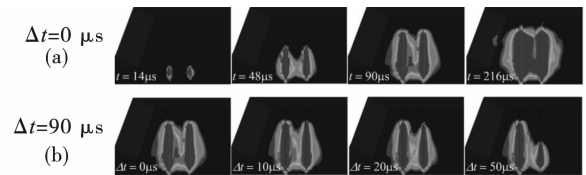


图 3 压缩损伤分布云图

Fig. 3 Distribution of compression and tensile damage

2 结果与讨论

2.1 应力扩展及损伤区域分析

不同孔间延时下, 炮孔轴线截面在各时间点的 Mises 应力分布和压缩损伤如图 2、图 3 所示。同时起爆时 ($\Delta t = 0 \mu\text{s}$), 在孔底装药爆破初期 $t = 14 \mu\text{s}$, 爆轰产生的冲击波是以球面波的形式在岩体中传播, 并在孔底开始形成类球状的压缩损伤区域, 此时应力及损伤区域的分布类似于单孔爆破。

当 $t = 45 \mu\text{s}$ 时, 爆轰波呈锥形沿着药柱向上传播, 爆炸冲击波逐渐开始以柱面波的形式向径向传播; 同时由于爆轰能量的不断增强, 压缩损伤区域也在以柱面的形式环向扩散。随着爆炸产生的能量不断释放, 炮孔底部形成的损伤区域开始贯通, 应力波出现叠加效应。之后当 $t = 90 \mu\text{s}$ 时, 两药柱的爆轰能量完全释放, 此时岩石在炮孔周围的损伤区域呈圆柱形分布。随着爆轰能量进一步地向外传递, 应力分布区域由内而外逐渐扩散, 炮孔周围应力开始

同时起爆时, 岩石内的应力分布左右对称, 应力波在孔间区域较早出现叠加; 当两炮孔延时起爆时, 药柱爆轰产生的冲击波一前一后呈锥形向上传播, 相同时间点下孔间应力叠加较晚。同时, 两孔起爆延时越长, 应力叠加区域越小, 压缩损伤区域贯通所需时间越长。根据岩石爆破的内部作用理论, 图 3(a) 中 $t = 216 \mu\text{s}$ 时所示最终压缩损伤区域即为粉碎区和粉碎区周围受到径向压应力的范围。

同时起爆后不同时刻下岩体水平截面拉伸损伤分布如图 4(a) 所示。在 $t = 85 \mu\text{s}$ 时, 炮孔周围开始出现径向损伤, 因为在爆炸冲击波作用下, 炮孔周围

岩石受到强烈的径向压缩作用,导致外围岩石出现径向位移和环向拉伸应变,从而形成径向损伤区域。同时,可观察到自由面附近出现了明显的层裂现象。随着爆轰能量的进一步增强,径向损伤区域逐渐扩大。越接近于自由表面,岩石中的损伤区域越明显;由于该区域的岩石处于不稳定状态,在爆破时最先被破坏并抛掷;而越接近于无限域,岩体的损伤发展愈发困难。不同孔间起爆延时条件下岩体水平截面拉伸损伤分布如图4(b)所示。由于炮孔Ⅱ(左)的爆轰能量释放过程快于炮孔Ⅰ(右),导致炮孔Ⅱ周围岩体较快形成损伤,且损伤区域较大。同时,可以观察到随着孔间起爆延时的增加,炮孔Ⅰ附近自由面发生层裂的时间点越晚且层裂范围越小。

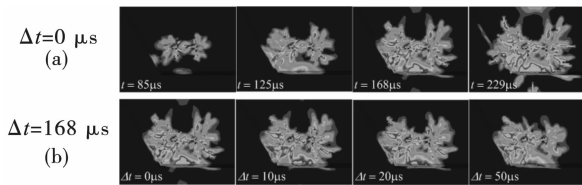


图4 拉伸损伤分布云图

Fig. 4 Distribution of compression and tensile damage

2.2 损伤体积分析

在CDP材料模型中,当损伤因子大于0.6时,可认为岩体内部开始出现宏观裂缝的扩展,并且岩体得到了较为完全的破碎^[15]。统计得到了不同孔间延时条件下损伤 D 达到0.6的单元体积时程曲线(见图5)。药柱起爆后,随着爆轰波的传播,其能量释放速率先快速增加,达到稳定爆轰后保持恒定,当爆轰波到达顶部时,爆轰能量释放速率逐渐降低。在起爆前期,起爆延时使得后爆药柱在相同时间点释放的爆轰能量有着较大差异;因此,在孔间延时较大的工况下,同一时间点用于岩体破碎的爆轰能量越低,因此岩体损伤体积越小。

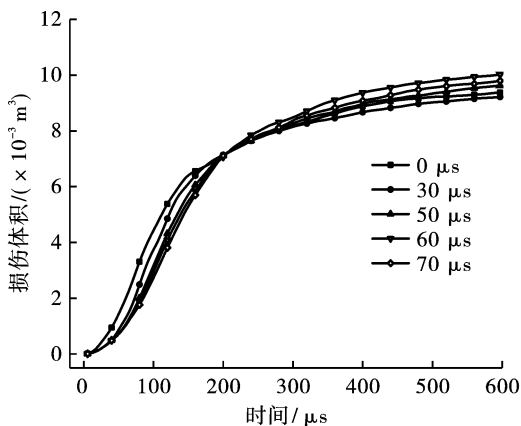


图5 损伤体积时程曲线

Fig. 5 Time-history curve of damage volume

随着时间的增加,药柱爆轰释放的能量不再是影响岩体损伤的主要因素。当 $t = 200 \mu\text{s}$ 时,各延时条件下的损伤体积达到相近值;在 $t = 600 \mu\text{s}$ 时,各工况的损伤体积达到稳定值。从各曲线稳定后的峰值可以发现,除 $\Delta t = 30 \mu\text{s}$ 以外,其余各孔间延时条件下岩体损伤体积均大于同时爆破,表明本研究采用的精确延时爆破工况在一定延时范围内有利于岩体内裂缝的扩展,改善爆破效果。

为了进一步探究孔间延时对于岩体损伤体积的影响,作出不同孔间延时下岩体损伤体积的拟合曲线(见图6)。在 $0 \sim 30 \mu\text{s}$ 范围内,随着孔间延时 Δt 的增加,岩体损伤体积的稳定值(峰值)逐渐降低;当孔间延时大于 $30 \mu\text{s}$ 时,峰值开始呈上升趋势,并在 $\Delta t = 60 \mu\text{s}$ 时到达最大值;之后随着延时的进一步增加,损伤体积开始逐渐降低并趋于稳定值。

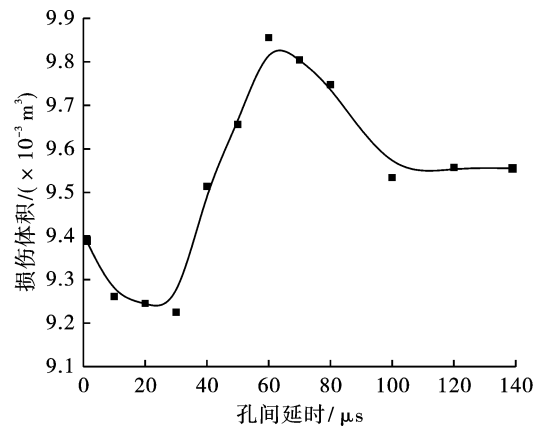


图6 损伤体积与孔间起爆延时拟合曲线

Fig. 6 Relationship between damage volume and initiation delay

2.3 测点应力分析

图7是炮孔轴线截面各测点的应力时程曲线,其中(a~b)分别是炮孔间纵向上部5个测点和下部3个测点的应力时程曲线。从底部单点向上爆破的时候,爆炸释放的能量先增加后减小,位于药柱中部的测点Node.4的等效应力最大,并向上下两侧逐渐衰减。图(c~d)为药柱Ⅱ两侧测点的应力时程曲线,两炮孔同时爆破时,药柱周围区域的等效应力时程曲线类似于单孔爆破,而在较远处开始出现显著差异。

为了探究精确延时爆破对典型测点应力峰值的影响,进行多组延时爆破工况数值仿真,得到图8所示Node.4的压力和等效应力峰值与爆破延时的关系拟合曲线。随着爆破延时的增加,最大压力和等效应力值先在小范围内进行下降后开始快速增大,并在 $\Delta t = 60 \mu\text{s}$ 时达到最大值,之后压力及等效应

力最大值开始逐渐减小并趋于一稳定值。

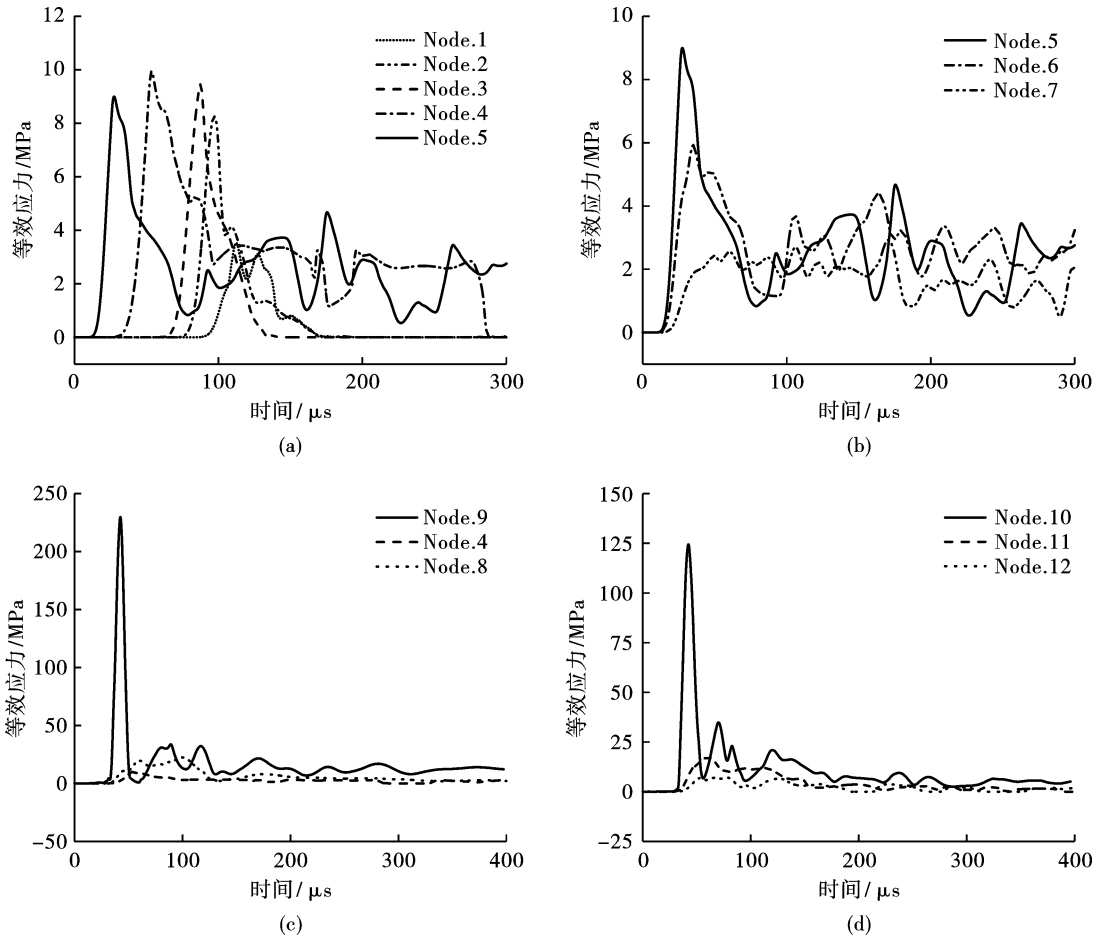


图7 同时起爆时各测点应力时程曲线

Fig. 7 Stress history curves of measuring nodes with simultaneous detonation

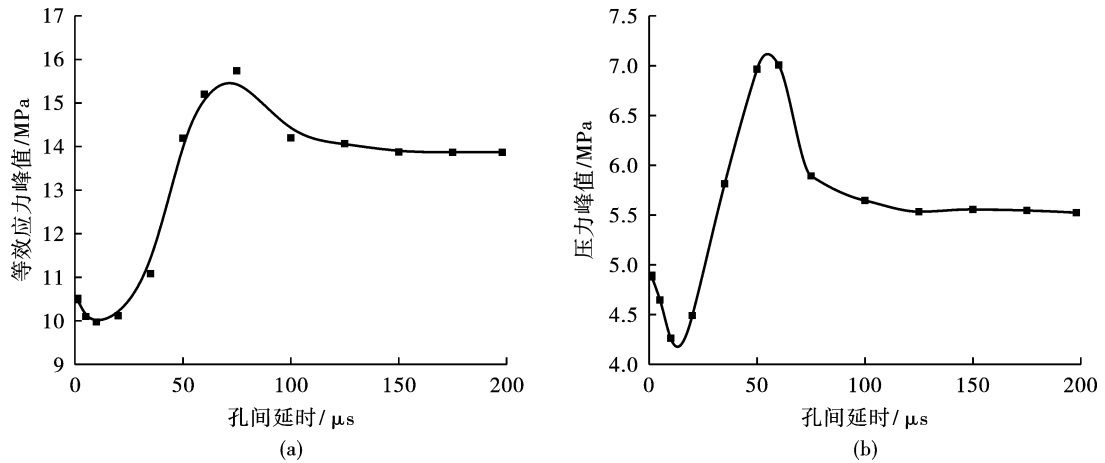


图8 Node.4处压力和等效应力峰值随爆破延时变化曲线

Fig. 8 Variation of max-pressure and max-stress at Node.4 with delay time

2.4 振动效应分析

由于爆破作业都以爆破振动最大峰值速度来描述振动效应的强度^[16,17],本研究对于振动效应的分析主要关注岩体质点在X和Z方向上的振速峰值。

图9为炮孔II左侧测点和炮孔I右侧测点在X

方向上的振动时程曲线。两侧振动波形及幅值随时间变化的趋势相似,由于测点分布于炮孔X向两侧,各向测点振速峰值方向相反。随着爆炸冲击波在岩体内传播,其各测点速度波峰峰值先增大后减小。

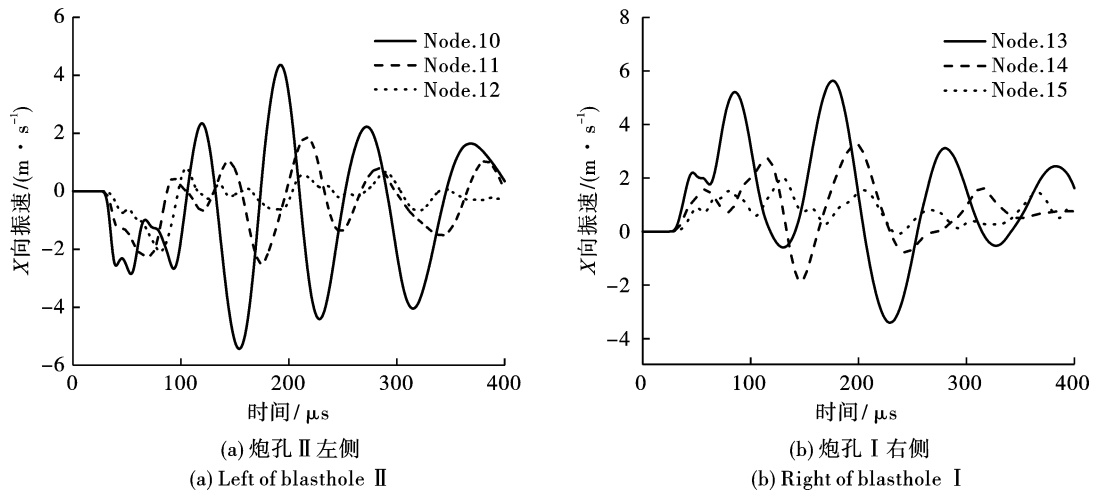


图9 两炮孔外侧测点X向振动时程曲线

Fig. 9 X-direction vibration velocity time-history curve of outer nodes of two blasthole

图10为顶部自由面两炮孔中垂线上5个测点的Z向时程曲线。图10(a)所示为远离边坡一侧的三点的Z向速度时程曲线,其变化趋势一致。由于应力波随传播半径的增加而不断衰减,同时应力波在测点处所产生的振动沿Z轴分量随着距离的增加而减少,导致测点的Z向速度峰值逐渐减小;靠近边坡三个测点的Z向速度时程曲线如图10(b)所示,由于Node.18处于两炮孔连线中点,其速度峰值略大于Node.17,而由于Node.16处于台阶边坡,当

应力波传播于此处时会产生反射拉伸,因此其振速峰值显著大于前两个测点,也即是边坡处的爆破振动效应大于岩石内部的振动效应。

图10(c)为台阶表面各测点的Z向振速随爆心距的变化曲线。顶部自由面各测点的Z向振速峰值随着距离增大而逐渐减小。这体现了爆破过程顶部自由面的隆起效应,且距离炮孔越近,自由面质点凹凸的幅度越大。

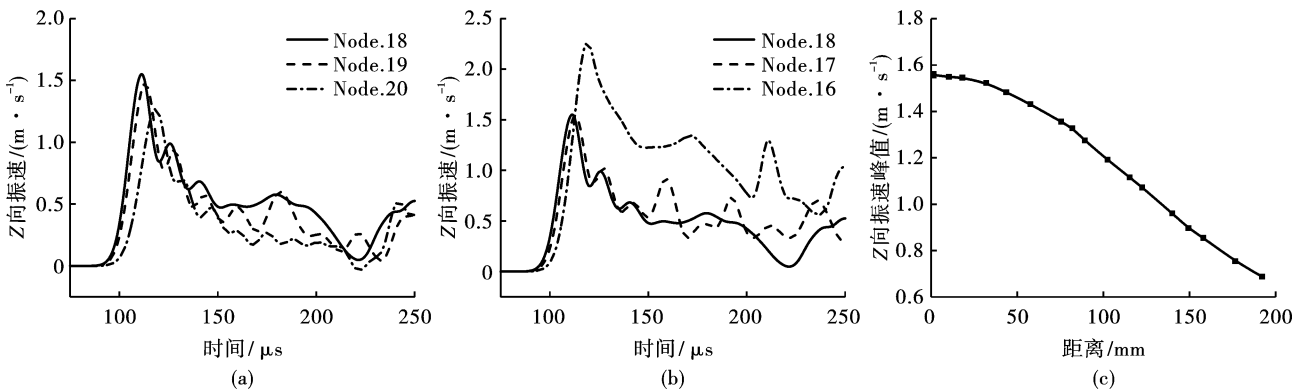


图10 台阶表面测点的Z向速度振动曲线

Fig. 10 Z-direction vibration velocity time-history curve of the measuring nodes

不同爆破延时下,轴向截面炮孔II左侧和炮孔I右侧不同距离上各测点在X和Z方向上振速峰值如图11所示。两炮孔两侧的振速峰值变化均符合指数衰减的规律,在炮孔近区,相同距离上左右测点的速度峰值基本相同;而在远区,由于左侧测点靠近自由面,应力波在自由面处反射拉伸形成的振动效应较强,导致左侧测点的振速峰值衰减慢于右侧测点。所有测点的最大两向振速峰值均出现在延时爆破,孔间起爆延时加剧了岩体内部的动态破坏

程度。

图12(a~b)是顶部自由面上Node.21在不同爆破延时下的Y向和Z向振动时程曲线。随着爆破延时的增加,Node.21的Y/Z向振动峰值速度均逐渐降低,而且随着延时的增加,时程曲线的重叠部分增多,当爆破延时超过20 μs时,时程曲线的第一个波峰完全重叠,波峰值降至最低。当孔间延时超过50 μs后,振动时程曲线的变化幅度逐渐降低并趋于稳定。

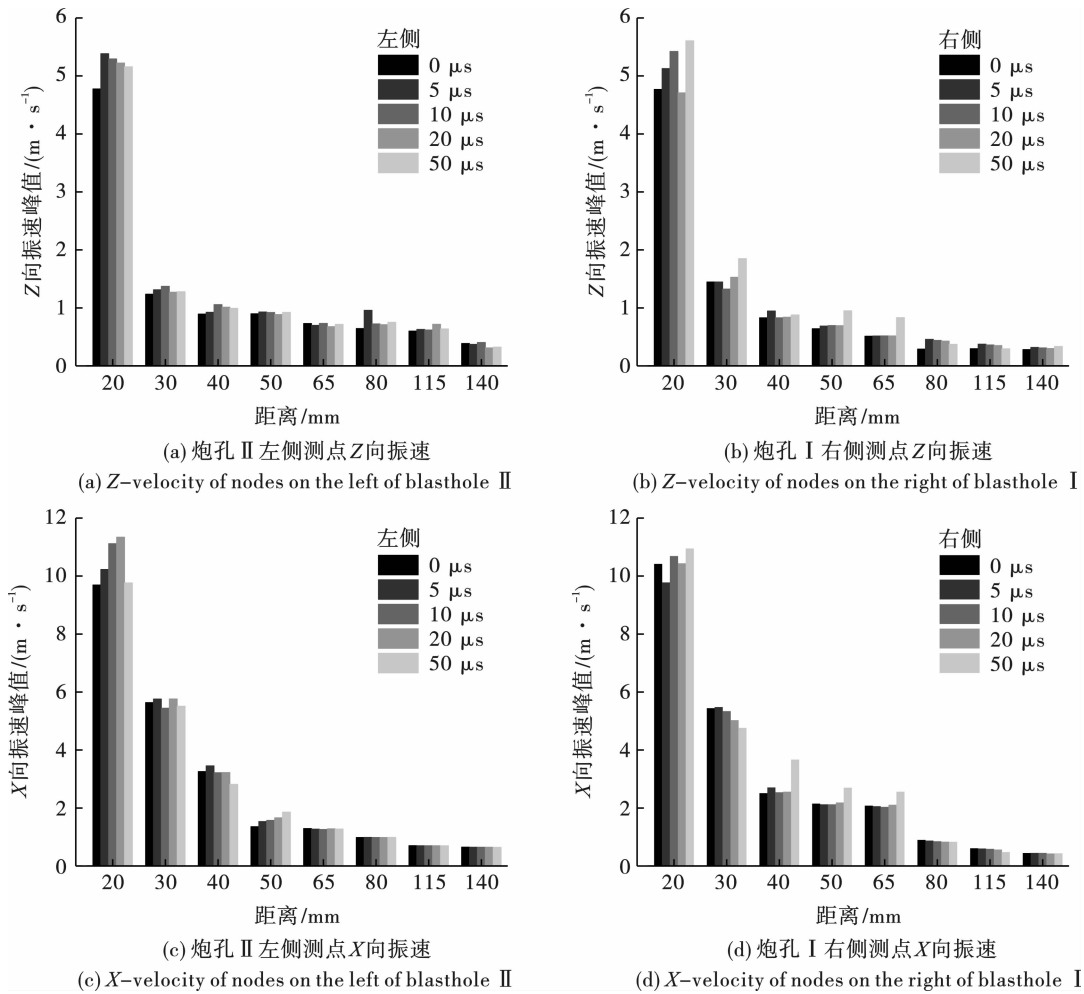


图 11 炮孔两侧测点振速峰值柱状图

Fig. 11 Histogram of peak vibration velocity of nodes on both sides of the blastholes

台阶顶面各测点 Y 向振速峰值随离炮孔连线距离变化曲线如图 12(c) 所示。随着离爆源的距离增加, 顶部自由面上各测点在 Y 方向上的最大振动速度呈现出先快速增加后缓慢下降的趋势, 同时最大 Y 向振速的测点约位于 150 mm 处。随着爆破延

时的增加, 顶部自由面各测点的 Y 向振速逐渐降低, 相比于同时爆破分别降低了 15.93%、29.16%、40.64% 和 42.56%。随着孔间起爆延时的增加, 台阶表面各点振速峰值逐渐降低并趋于稳定。

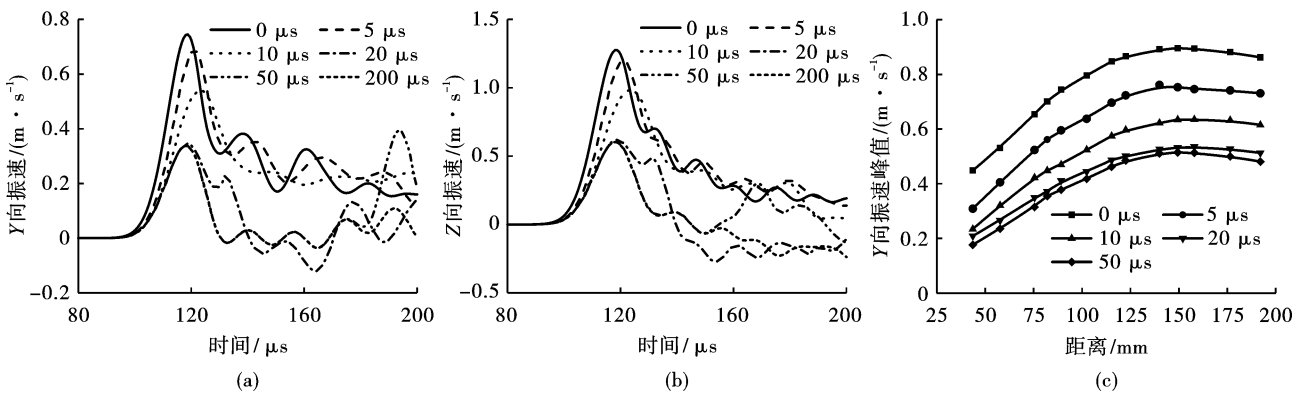


图 12 不同起爆延时下台阶表面测点振动速度

Fig. 12 Vibration velocity of surface measuring nodes by different initiating

3 结论

1) 在台阶表面,随着爆心距的增加,各测点 Y 向(水平)振速峰值均呈现出先增加再减小的趋势,最大 Y 向(水平)振速的测点位于150 mm(1.25倍孔距)处;而 Z 向(竖直)振速峰值始终处于逐渐减小趋势;台阶顶部自由面的振动主要表现在竖直方向上。

2) 越接近于自由表面,岩体中的质点应力峰值和爆破振动效应越大,损伤区域越明显。随着孔间爆破延时的增加,炮孔附近自由面发生层裂的时间点越晚且层裂发生的范围越小。

3) 合理的孔间爆破延时能够有效提高岩体内部质点应力状态,同时减小围岩爆破振动效应。随着孔间爆破延时的增加,岩石内测点应力值先快速增大后缓速下降,并在 $\Delta t = 60 \mu\text{s}$ 时达到最大值;随着延时增加,顶部自由面各测点的 Y 向(水平)振速峰值逐渐降低并于 $\Delta t = 50 \mu\text{s}$ 时趋于稳定。可认为孔间延时 $\Delta t = 60 \mu\text{s}$,也即是0.5 ms/m(孔间延时与孔距比值)为本模型最佳爆破延时。

参考文献 (References)

- [1] YI C, JOHANSSON D, NYBERG U, et al. Stress wave interaction between two adjacent blast holes[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(5): 1803-1812.
- [2] 陈士海, 燕永峰, 戚桂峰, 等. 微差爆破降震效果影响因素分析[J]. *岩土力学*, 2011, 32(10): 3003-3008.
- [2] CHEN S H, YAN Y F, QI G F. Analysis of influence factors of interference vibration reduction of millisecond blasting[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(10): 3003-3008. (in Chinese)
- [3] SHI X Z, CHEN S R. Delay time optimization in blasting operations for mitigating the vibration-effects on final pit walls' stability[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2011, 31(8): 1154-1158.
- [4] 楼晓明, 周文海, 简文彬, 等. 岩石破碎机理的微差爆破最佳延时控制[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(2): 158-163.
- [4] LOU X M, ZHOU W H, JIAN W B. Millisecond blasting optimal time delay control based on rock breaking mechanism[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(2): 158-163. (in Chinese)
- [5] SCHILL M S J. Finite element simulations of blasting and fragmentation with precise initiation[C] // 12th International LS-DYNA User Conference, Dearborn, 2012: 1-10.
- [6] 苏波, 高可帅, 宋瑞富. 毫秒延时爆破振动叠加作用的数值模拟研究[J]. *工程爆破*, 2012, 18(3): 12-16.
- [6] SU B, GAO K S, SONG R F. Numerical simulation research on vibration superposition effects in the millisecond delay blasting[J]. *Engineering Blasting*, 2012, 18(3): 12-16. (in Chinese)
- [7] 李顺波, 杨仁树, 杨军. 精确延时对台阶爆破岩石破碎块度影响的数值模拟研究[J]. *爆破器材*, 2016, 45(3): 11-16.
- [7] LI S B, YANG R S, YANG J. Numerical simulation of the impact of precise time delay on rock fragmentation in bench blasting[J]. *Explosive Materials*, 2016, 45(3): 11-16. (in Chinese)
- [8] YI C, SJÖBERG J, JOHANSSON D, et al. A numerical study of the impact of short delays on rock fragmentation[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 100: 250-254.
- [9] 孙从煌, 曲艳东, 孔祥清, 等. 岩石介质中双孔爆破效应的数值模拟研究[J]. *爆破*, 2017, 34(3): 37-45.
- [9] SUN C H, QU Y D, KONG X Q. Numerical simulation of explosion effects of double-hole blasting in rock medium[J]. *Blasting*, 2017, 34(3): 37-45. (in Chinese)
- [10] 杨军, 任光, 于琦, 等. 台阶爆破岩石破碎楔块理论及数值模拟研究[J]. *爆破*, 2015, 32(3): 55-61.
- [10] YANG J, REN G, YU Q. Wedge theory of rock fragmentation for bench blasting and its numerical simulation[J]. *Blasting*, 2015, 32(3): 55-61. (in Chinese)
- [11] YANG J, LIU X, XU Z, et al. Full-Field strain characterizations and fracture process of rock blasting using a small-scale double-hole bench model[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 20: 1-13.
- [12] 张国丽, 苏军. 基于ABAQUS的钢筋混凝土非线性分析[J]. *科学技术与工程*, 2008(20): 5620-5624.
- [12] ZHANG G J, SU J. Nonlinearity analysis of reinforced concrete based on ABAQUS[J]. *Science Technology and Engineering*, 2008(20): 5620-5624. (in Chinese)
- [13] ZAID M, SADIQUE MR, ALAM MM, et al. Effect of shear zone on dynamic behaviour of rock tunnel constructed in highly weathered granite[J]. *Geomechanics and Engineering*, 2020, 23(3): 245-259.
- [14] STOXREITER T, GEHWOLF P, GALLER R. Alternative approaches for the determination of unconfined rock deformation and Strength properties[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2020, 53(1): 411-433.
- [15] HE C, YANG J. Laboratory study of dynamic mechanical characteristic of granite subjected to confining pressure and cyclic blast loading[J]. *Latin American Journal of Solids And Structures*, 2018, 15(5): 44.
- [16] 易长平, 冯林, 王刚, 等. 爆破振动预测研究综述[J]. *现代矿业*, 2011, 27(5): 1-5.
- [16] YI C P, FENG L. A review of research on blasting vibration prediction[J]. *Modern Mining*, 2011, 27(5): 1-5. (in Chinese)
- [17] 雷振. 台阶爆破振动效应非线性预测方法研究及应用[D]. 北京: 中国矿业大学, 2015.
- [17] LEI Z. Research and application on nonlinear prediction methods of bench blasting vibration effect[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2015. (in Chinese)