

# 围压下空孔直径对直眼掏槽爆破振动的影响

张宪堂<sup>1</sup>,董国庆<sup>1</sup>,余辉<sup>1</sup>,张经双<sup>2</sup>,周红敏<sup>1</sup>,朱宝合<sup>3</sup>,殷振<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 土木工程与建筑学院,山东 青岛 266590;

2. 安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心,安徽 淮南 232001;

3. 中国建筑第五工程局有限公司,湖南 长沙 410004)

**摘要:**为研究围压条件下直眼掏槽爆破振动在不同空孔直径下的变化规律,利用自主设计的大型双轴组合式加载框架及电液伺服加载系统,对边长为 600 mm、砂胶比为 2:1 的立方体水泥砂浆试块进行双轴等围压加载掏槽爆破模型试验,并通过数值模拟分析进行对比研究。结果表明:施加围压产生初始应力对爆破振动的影响表现为速度时程曲线上的不同步性;掏槽爆破引起的质点振动合速度峰值随着空孔直径的增加呈现先增大后减小的趋势;空孔直径采用 1 倍和 2 倍炮孔直径时,低频带能量占比减少,爆破振动信号频带能量有向中高频移动的趋势,可以有效降低直眼掏槽爆破振动效应。

**关键词:**空孔直径;直眼掏槽;爆破振动;频带能量;数值模拟

中图分类号:TD235

文献标志码:A

## Influence of empty hole diameters on blasting vibration of parallel cut under confining pressure

ZHANG Xiantang<sup>1</sup>, DONG Guoqing<sup>1</sup>, YU Hui<sup>1</sup>, ZHANG Jingshuang<sup>2</sup>,

ZHOU Hongmin<sup>1</sup>, ZHU Baohe<sup>3</sup>, YIN Zhen<sup>1</sup>

(1.College of Civil Engineering and Architecture, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Engineering Research Center of Underground Mine Construction, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;

3. China Construction Fifth Engineering Division Co. Ltd, Changsha 410004, China)

**Abstract:** In order to study the variation law of blasting vibration of parallel cut under different empty hole diameters under confining pressure, cubic cement mortar test blocks with the sand cement ratio of 2:1 and the side length of 600 mm were first made. Then, the biaxial equal confining pressure loading cut blasting model test on the cubic cement mortar test blocks was carried out by using the self-designed large combined steel frame with electro-hydraulic servo loading system. Finally, a comparative study was conducted through numerical simulation analysis. The results show that the influence of initial stress from the application of the confining pressure on blasting vibration is manifested as asynchrony on velocity time-history curve. When the empty hole diameter increases, the peak velocity of particle vibration due to cut blasting increases first and then decreases. When the empty hole diameter is the same and twice of the diameter of blast hole, the proportion of low frequency band energy decreases, and the frequency band energy of blasting vibration signal tends to move to medium and high frequency, which can effectively reduce the vibration effect of parallel hole cutting blasting.

**Key words:** empty hole diameter; parallel cut; blasting vibration; energy of each band; numerical simulation

收稿日期:2022-11-22

基金项目:国家自然科学基金项目(51874189);矿山地下工程教育部工程研究中心开放基金项目(JYBGCZX2021102)

作者简介:张宪堂(1973—),男,河北井陘人,教授,博士生导师,主要从事岩土结构动力学和爆破工程研究。

E-mail: zzxhtm@sdust.edu.cn

岩巷爆破掘进的关键在于掏槽,直眼掏槽爆破技术因其破岩效果好、效率高和施工简单的特点被广泛应用于深部资源开采。但深部岩体所处的复杂地应力环境不可避免地影响掏槽破岩效果,深部岩体爆破开挖必须考虑初始应力与爆炸荷载的叠加作用<sup>[1-2]</sup>。掏槽孔布设形式、位置以及装药量的改变也会对爆破效果产生影响,获得理想的爆破效果并有效控制爆破振动产生的影响是当前掏槽爆破研究的热点<sup>[3]</sup>。许多学者基于掏槽爆破效果优化和爆破振动控制进行了大量研究。在爆破参数研究方面,普遍采用增加空孔以及改变空孔参数来获得更好的爆破效果。张召冉等<sup>[2]</sup>通过理论分析与算例验证,分析了空孔效应对直眼掏槽爆破破岩的作用机理,并给出了炮孔间距、炮孔与空孔间距合理范围的确定公式;Meng等<sup>[4]</sup>通过对比研究不同空孔直径下的爆破数值模型,发现空孔的存在会显著提高空孔附近的拉应力及应力集中系数,同时随着空孔直径的增加,压缩损伤单元的比例降低,拉伸损伤单元的比例增加;李启月等<sup>[5]</sup>为了研究直眼掏槽时空孔周围岩体的破坏机理,在原有直眼掏槽空孔效应计算模型的基础上,考虑爆炸应力分布的角度以及空孔所在区域的影响,提出了更符合实际工程的改进计算模型。在初始应力下直眼掏槽爆破的研究方面,研究发现地应力表现为对爆破裂纹的抑制作用,同时爆破裂纹更趋向于沿施加高初始应力的方向扩展,沿较高地应力方向布孔可以获得更好的爆破效果<sup>[6-8]</sup>。对爆破振动的研究,主要集中于通过分析现场实测与数值模拟得到的爆破振动数据来降低爆破振动效应。赵明生等<sup>[9]</sup>对露天矿现场实测爆破振动数据进行时频分析,发现多段爆破时爆破振动信号能量中高频能量占比较多且持续时间较长;孙振等<sup>[10]</sup>通过数值模拟对比分析了不同布置位置和形式下减震孔的降振效应,提出设置双排梅花形减震孔在小间距隧道爆破施工中的减振效果更好;李强等<sup>[11]</sup>利用希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)原理分析出矿巷道中实测爆破振动波的频谱特征,发现爆破振动信号能量以低频能量为主。

上述研究多是围绕无围压条件下改变空孔直径对爆破效果的影响或仅是在数值模拟中考虑初始应力展开分析,围压条件下空孔直径对爆破振动影响的试验研究还较少。因此,本研究以水泥砂浆为模型材料进行双轴围压条件下直眼掏槽爆破模型试验,并结合数值模拟分析不同空孔直径下直眼掏槽爆破振动的变化规律,以降低爆破振动对深部巷道围岩稳定性及支护结构产生的影响。

## 1 掏槽爆破模型试验

### 1.1 模型试验设计

岩石爆破模型试验要求模型材料的性质与岩石性质相似,试验模型采用水泥砂浆制作,炮孔底部近似耦合装药。为使模型试验与现场爆破具有良好的相似性,掏槽孔布设形式为菱形四孔含空孔掏槽。模型参数根据几何相似确定:水泥砂浆模型尺寸为60 cm×60 cm×60 cm,炮孔直径为1.6 cm,炮孔间距为5 cm,炮孔与空孔距离为3.5 cm,炮孔与空孔深度均为16 cm,装药长度与炮孔堵塞长度均为8 cm。试验炮孔深度与几何相似后的深度有所差别,但炮孔长径比 $L/d > 10$ 时,相似比对测试结果的影响不大<sup>[12]</sup>。考虑到能量相似原则和实际室内试验条件,4次试验均采用数码电子雷管代替炸药,每发电子雷管炸药量约为1 g。每个炮孔装填两发电子雷管,采用定性和定量相结合的方式对模型试验<sup>[13]</sup>,4炮孔同时起爆。炮泥材料选用细砂和土作为填塞物,填塞时将填塞物捣实,避免出现堵塞不密实的情况。

采用自主设计的大型双槓组合式加载框架及电液伺服加载系统,对模型进行双轴等围压加载。考虑到水泥砂浆为低强度脆性材料,应力取模型抗压强度的10%,水平方向所施加应力 $\sigma_H$ 和竖直方向所施加应力 $\sigma_v$ 均为1.0 MPa。利用模型试验分析直眼掏槽爆破在不同空孔直径下保留围岩部分的爆破振动变化规律。由于空孔直径一般不小于炮孔直径,在炮孔与空孔间距不变的条件下,改变空孔直径形成对照,设计了1.6、2.4、2.8和3.2 cm 4种不同空孔直径的直眼菱形掏槽爆破模型试验。模型试验加载方式及振动传感器放置位置如图1所示。

### 1.2 试验爆破振动结果与分析

模型试验得到的爆破振动典型波形如图2所示。其中Z方向波形出现2次峰值,这是由于爆炸应力波传播到模型边界后继续向传感器块体内部传播进入负压,在传感器块体内部爆炸应力波又经反射后进入正压,从而Z方向波形出现第2次峰值。爆炸应力波波在X、Y、Z三个方向只出现了轻微叠加的情况,可以

用来判断不同空孔直径掏槽爆破测点对应的质点三向峰值振速。

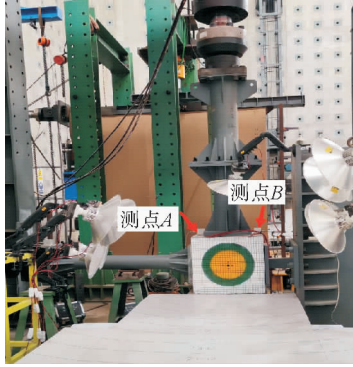


图1 模型试验加载方式和测点位置

Fig. 1 Loading mode and measuring point position of model test

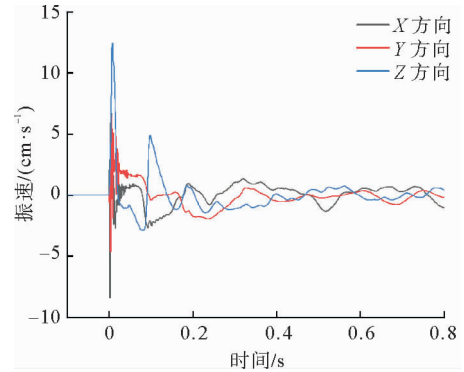


图2 爆破振动典型波形图

Fig. 2 Typical waveform of blasting vibration

### 1.2.1 三向峰值振速对比分析

根据模型试验实测数据,分别对不同空孔直径下测点 A、B 处的 X、Y、Z 三向峰值振速进行对比分析。由图 3 可以看出,随着空孔直径的增加,测点 A、B 三向峰值振速并未呈现明显的线性变化规律。但在 4 种空孔直径下,都表现出 Z 向峰值振速大于 X、Y 两个方向的峰值振速。故在实际爆破工程作业时,为了更好地减小爆破振动对保留岩体以及周围环境的影响,现场监测应更关注垂直方向(Z 向)的数据,及时调整爆破方案。

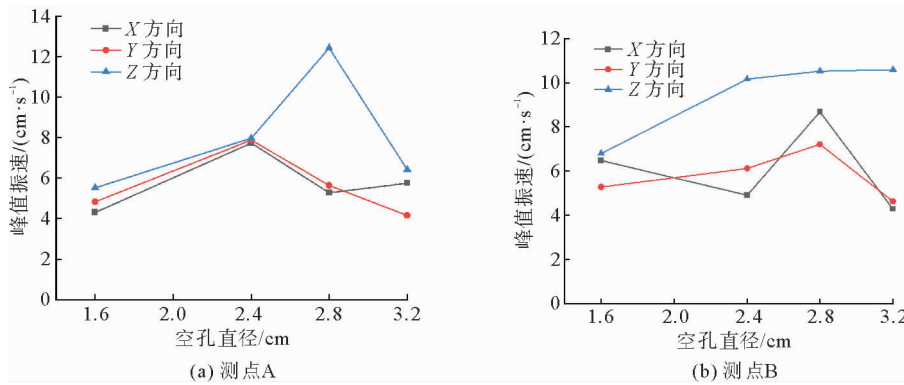


图3 模型试验测点三向峰值振速

Fig. 3 Three dimensional peak vibration velocity of model test

### 1.2.2 测点振动合速度峰值变化规律

利用 MATLAB 拟合出炸药所在断面测点的振动合速度峰值与空孔直径的关系,如图 4 所示,两者呈非线性变化。试验中随空孔直径的增大测点 A、B 的振动合速度峰值表现为先增大后减小的规律,如图 5 所示。

由图 4 拟合曲线得到炸药量为 8 g 时,炸药所在断面测点振动合速度峰值为:

$$V_{\max} = -0.051d^2 + 2.579d - 20.145. \tag{1}$$

式中, $d$  为空孔直径。

图 5 中测点 B 的振动合速度峰值总体大于测点 A,分析是由于水泥砂浆模型内部介质不均匀,爆炸应力波在传播过程中衰减速度不同。在空孔直径为 2.8 cm 时达到最大振动合速度,当空孔直径为炮孔直径的

1.5 倍时,测点振动合速度峰值增加了 52.4%;当空孔直径为炮孔直径的 1.75 倍时,测点振动合速度峰值增加了 63.1%。而随着空孔直径的进一步增大,增大为 2 倍炮孔直径时,测点振动合速度峰值仅增加了 19.4%,此时合速度峰值随空孔直径的增大呈现出下降的趋势。

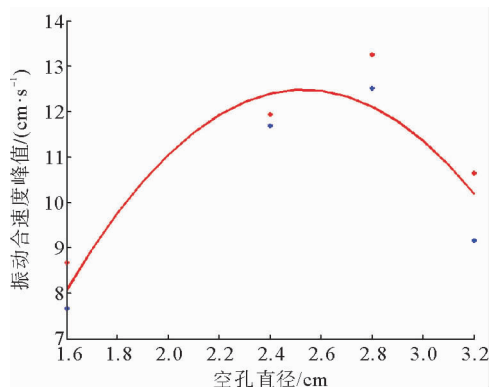


图 4 振动合速度峰值与空孔直径拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve between peak value of vibration resultant velocity and empty hole diameter

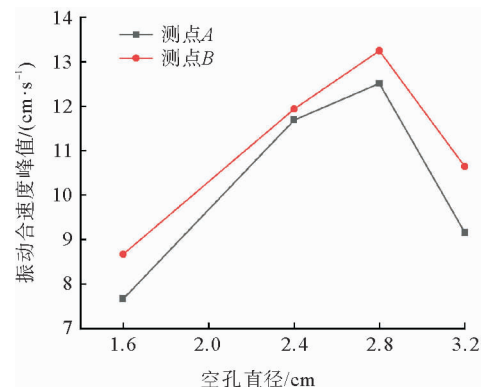


图 5 测点振动合速度峰值变化规律

Fig. 5 Variation law of peak value of vibration resultant velocity at measuring points

掏槽爆破过程中若不设置空孔,应力波需要传到开挖面才能产生反射拉伸作用。当空孔直径在 1.6~2.8 cm 时,由于空孔的自由面效应,初始应力场和爆炸应力波共同作用产生的叠加应力波传播到空孔壁表面时,在空气与岩石的交界面发生反射产生拉伸应力波<sup>[2]</sup>。这种反射拉伸作用导致测点振速随着空孔直径的增加而增大。随着空孔直径的进一步增大,空孔的应力集中效应减弱、自由面效应过强,会使得大量爆生气体从空孔逸出,用于破碎岩石的能量减少,空孔出现卸压现象,从而使得在空孔直径进一步增大的情况下,所测得的爆破振动开始出现减小的趋势。

### 1.2.3 爆破振动信号频带能量分布特征分析

目前对爆破振动的研究主要集中于爆破振动峰值和爆破振动信号能量两个方面,有效提取爆破振动信号的频带能量分布特征,对于岩石巷道爆破中降低爆破振动效应,指导爆破参数设计具有重要意义。为了充分研究空孔直径的改变对爆破振动的影响,根据采样定理<sup>[14]</sup>,试验设置采样率为 1 000 Hz,则其奈奎斯特频率为 500 Hz,选用目前应用较为广泛的多贝西 8 (daubechies 8) 小波基将振动信号进行 7 层分解,得到 8 个等宽度频带,其中最低频带为 0~62.5 Hz。利用各频带能量表征公式<sup>[15]</sup>,得到各频带能量占比分布如图 6 所示,分析不同空孔直径条件下爆破振动信号不同频带能量的分布。可以看出以下能量分布特征:

1) 爆破振动信号能量在 0~500 Hz 范围内均有分布,但能量主要分布在第 1~4 频带(0~250 Hz),空孔直径为 1.6、2.4、2.8、3.2 cm 时在第 1~4 频带内的能量占各自频带总能量的比例分别为 97.07%、98.06%、90.05%、93.93%。

2) 空孔直径为 2.4 和 2.8 cm,即 1.5 倍和 1.75 倍炮孔直径时,爆破振动信号能量主要集中在第 1 频带

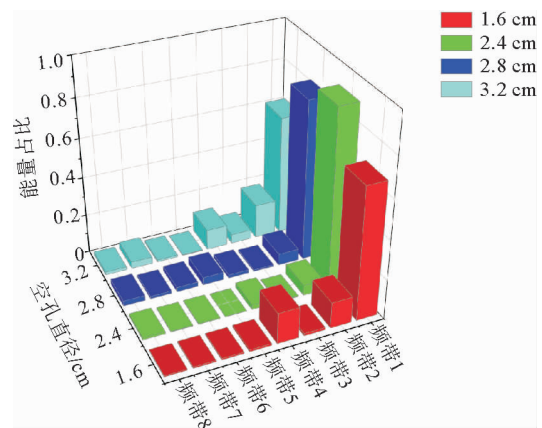


图 6 爆破信号各频带能量百分比

Fig. 6 Energy percentage of each frequency band of blasting signals

内,约占总能量的80%以上。当空孔直径为1.6和3.2 cm时,即1倍炮孔直径和2倍炮孔直径时,爆破振动信号能量有向中高频移动的趋势,高频能量占比相对增加,第1频带能量占比约为60%。因此采用1倍或2倍炮孔直径作为空孔直径,可以有效降低直眼掏槽爆破振动对深部巷道围岩稳定性及支护结构产生的影响。

## 2 数值模拟

### 2.1 数值模型的建立

模型尺寸设为300 cm×300 cm,简化为二维平面应变模型,模型四周设置无反射边界。根据试验模型参数,利用ANSYS/LS-DYNA有限元软件建立空孔直径为1.6、2.4、2.8和3.2 cm 4种不同空孔直径的岩石掏槽爆破数值模型,分别记为N16、N24、N28、N32。将围压施加于岩石材料边界处,利用关键字\*INTERFACE\_SPRINGBACK\_LSDYNA输出dynain文件,然后利用关键字\*INCLUDE将所获得的dynain文件添加到整个模型的k文件中,从而获得施加围压状态下的爆破模型。

### 2.2 计算力学参数选择

模拟采用流固耦合算法,岩石单元类型设置为SOLID164号单元,岩石材料使用Riedel-Hiermaier-Thoma模型(RHT模型),该模型是一种先进的塑性模型,可用于分析承受冲击和动态载荷的脆性结构的行为。岩石材料采用拉格朗日网格划分,模型关键字为\*MAT\_RHT。岩石力学参数的选取与相似模型试验材料保持一致,并参考文献[16]确定,具体参数如表1所示。

表1 RHT模型参数  
Table 1 Parameters of RHT model

参数名称	数值	参数名称	数值	参数名称	数值
材料密度 RO/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 700	抗压强度 FC/MPa	105	压缩屈服面参数 GC*	0.4
剪切模量 SHEAR/GPa	24.17	相对拉伸强度 FT*	0.04	拉伸屈服面参数 GT*	0.7
初始孔隙率 ALPHA	0	相对剪切强度 FS*	0.38	侵蚀塑性应变 EPSF	2.0
孔隙初始压碎应力 PEL/GPa	0.04	失效面参数 A	1.6	剪切模量折减系数 XI	0.5
孔隙完全压实应力 PCO/GPa	6.0	失效面指数 N	0.6	损伤参数 D <sub>1</sub>	0.04
Hugoniot 多项式系数 A <sub>1</sub> /GPa	86.71	孔隙度指数 NP	4.0	损伤参数 D <sub>2</sub>	1.0
Hugoniot 多项式系数 A <sub>2</sub> /GPa	145.67	参考压缩应变率 EOC	3×10 <sup>-5</sup>	最小失效应变 EPM	0.012
Hugoniot 多项式系数 A <sub>3</sub> /GPa	89.03	参考拉伸应变率 EOT	3×10 <sup>-6</sup>	残余应力强度参数 AF	1.62
状态方程参数 B <sub>0</sub>	1.68	失效压缩应变率 EC	3×10 <sup>25</sup>	残余应力强度指数 NF	0.6
状态方程参数 B <sub>1</sub>	1.68	失效拉伸应变率 ET	3×10 <sup>25</sup>	拉压子午比参数 Q <sub>0</sub>	0.68
状态方程参数 T <sub>1</sub> /GPa	86.71	压缩应变率相关指数 BETAC	0.010 6	罗德角相关系数 B	0.010 5
状态方程参数 T <sub>2</sub> /GPa	0	拉伸应变率相关指数 BETAT	0.014 4	压力对拉伸塑性流动的影响 PTF	0.001

炸药选用 SOLID164 号单元,模型关键字为 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN。为了计算爆轰产物的膨胀,采用 Jones-Wilkins-Lee(JWL)状态方程,用于反映爆炸后爆轰结果的体积和压力变化,JWL 状态方程如式(2)所示。炸药参数和状态方程参数如表 2 所示。

$$P_j = A(1 - \frac{\omega}{R_1 V})e^{-R_1 V} + B(1 - \frac{\omega}{R_2 V})e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \tag{2}$$

式中:P<sub>j</sub>为爆轰产物的压力;V为爆轰产物的相对体积;E<sub>0</sub>为爆轰产物的初始内能;A、B、R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、ω为状态方程参数。

表2 炸药及其状态方程参数  
Table 2 Parameters of explosive and its state equation

密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	爆速/(m·s <sup>-1</sup> )	A/GPa	B/GPa	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	ω	E <sub>0</sub> /GPa
1 200	3 300	214.4	0.182	4.2	0.9	0.15	4.192

空气材料模型选用 MAT\_NULL 空气材料模型,其状态方程由关键字 EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 定义,状态方程如式(3)所示。

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

式中:  $P$  为爆轰压力,  $C_i$  为状态方程参数,  $E$  为相对体积的单位初始内能,  $\mu = 1/(V - 1)$ ,  $V$  为相对体积。具体空气材料模型参数和状态方程参数见表 3。

表 3 空气材料和状态方程相关参数

Table 3 Relevant parameters of air material and state equation

密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E/\text{GPa}$
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	$2.5 \times 10^{-4}$

### 2.3 数值模拟验证

将数值模拟得到的损伤云图与模型试验得到的模型表面裂纹进行对比分析。图 7(a) 为 N28 模型爆破最终时刻损伤云图,即炸药所在断面裂纹扩展情况,图 7(b) 为模型试验爆破完成后模型表面裂纹扩展情况。

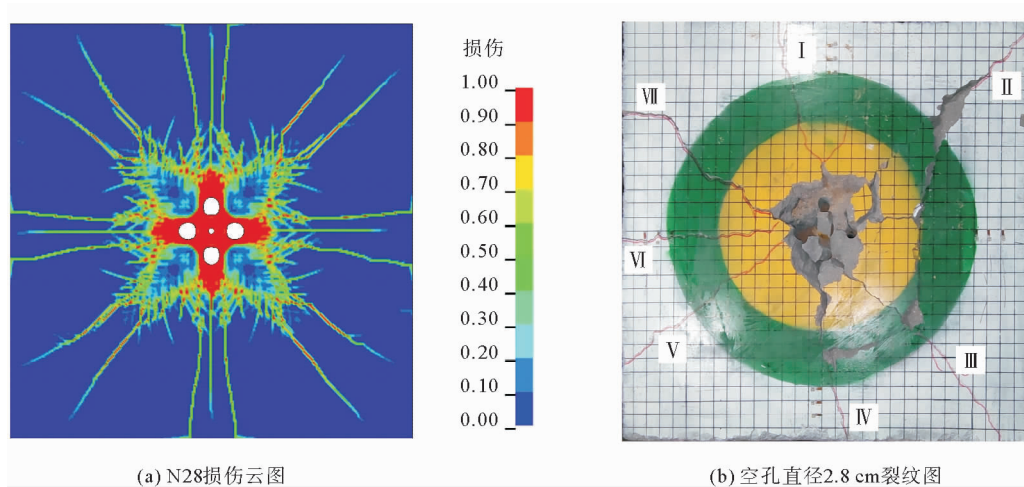


图 7 模拟与试验裂纹对比图

Fig. 7 Comparison diagram of simulated and test cracks

试验采用底部装药,电子雷管放置在炮孔底部,模型表面主裂纹以及次生裂纹数目要小于模型内部炸药所在断面的裂纹数目,但可以反映裂纹总体的扩展趋势。对比图 7(a) 和图 7(b) 可以看出,模拟得到的损伤云图与爆破试验后试块表面的主裂纹扩展趋势能够较好吻合,进一步验证了模拟参数选取以及模拟求解的可靠性。

### 2.4 模拟结果分析

#### 2.4.1 模拟振速分析

选取模拟中同一特征单元在有无围压条件下的速度时程曲线进行对比分析。观察图 8 可知,在有无围压条件下,所选取单元的振动合速度峰值基本一致,到达峰值时间基本相同,即围压对爆炸前期爆炸应力波的传播影响很小。在围压作用下爆破时,所施加的围压产生的初始应力与爆炸所产生的应力相互叠加从而产生不同的爆破效果。距离爆源较近区域,由于爆炸冲击波所产生的应力远大于所施加围压的初始应力,此时围压对爆破效果的作用不明显。随着爆炸的继续进行,冲击波和应力波在传播过程中不断衰减,当冲击波和应力波所产生的应力与所施加围压的初始应力相近时,围压对爆破效果会产生较为明显的影响。相邻炮孔应力波的叠加作用,使得速度时程曲线在  $200 \mu\text{s}$  出现峰值,随着应力波在岩石介质中的进一步传播,爆炸产生应力逐渐减小,图 8 中围压在爆炸后期开始对爆破效果产生影响,表现为速度时程曲线的不同



步性。

在4个模型中的相同位置分别等距选取5个特征单元,对所选取特征单元的合速度时程曲线进行对比,进而对围压条件下不同空孔直径对掏槽爆破振动的影响进一步分析。各特征单元在不同空孔直径下的振动合速度变化趋势如图9所示。

由于爆炸产生的应力波在岩石空间内三个传播方向产生的振动效应不同<sup>[17]</sup>。合速度峰值出现的时刻与三向峰值出现时刻不同,并且其大小一般都要大于三向峰值振速,因此有必要对不同空孔直径下的振动合速度峰值进行分析。从图9模拟结果可以明显看出,4种不同空孔直径下,各模型随着爆破时间的推进,由于爆炸应力波不断的叠加作用,选取的各特征单元的振动合速度不断出现起伏,且随着所选取单元与爆破中心的距离增加,爆破振动合速度峰值呈递减的趋势,符合爆破振速衰减规律。对比各模型振动合速度曲线也可知,距离爆破中心越近的单元首次出现峰值的时间越短且爆破振动合速度峰值越大。

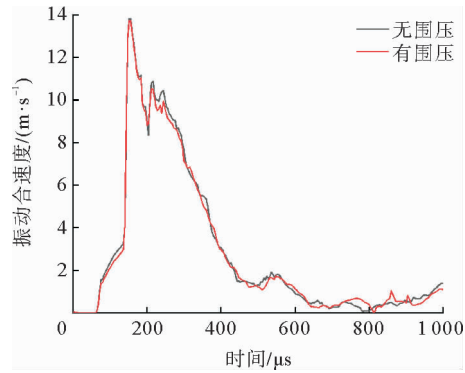


图8 有无围压特征单元速度时程曲线对比

Fig. 8 Comparison of velocity time history curves of characteristic units with and without confining pressure

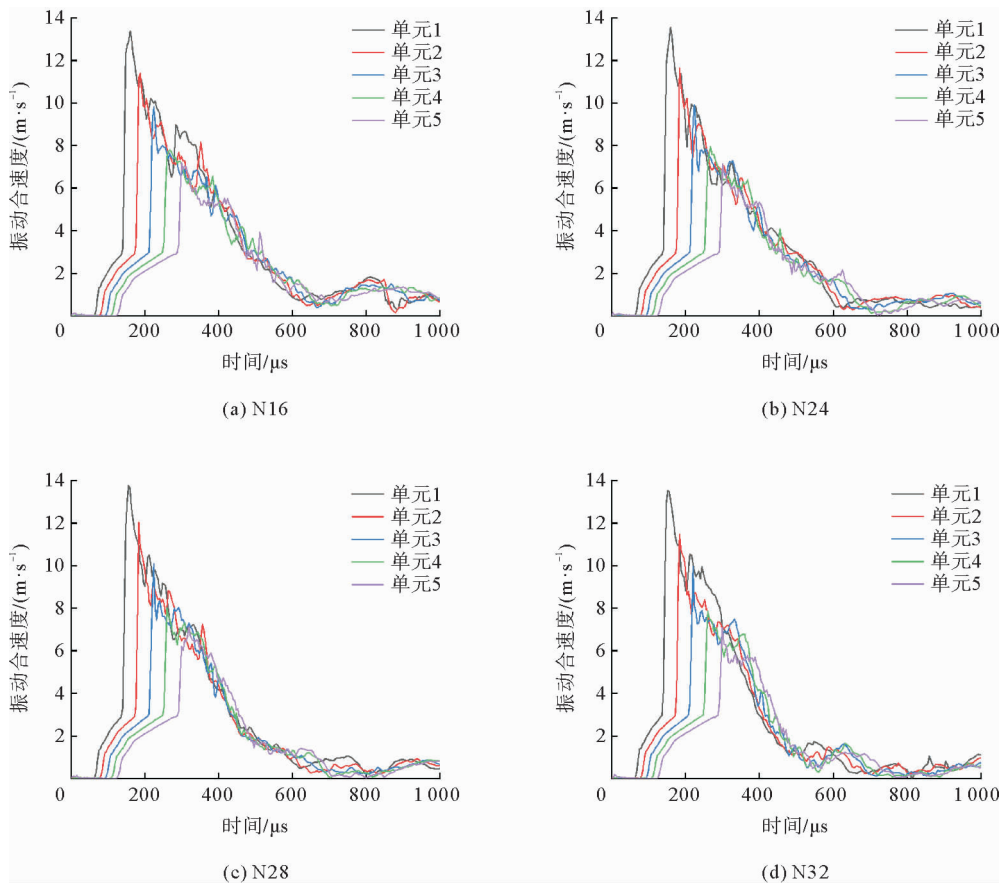


图9 不同空孔直径下特征单元振速曲线

Fig. 9 Vibration velocity curve of characteristic unit under different hole diameters

### 2.4.2 模拟与试验测点振动合速度峰值分析

根据模型试验传感器放置位置,模拟中尽可能与试验测点位置接近,取数值模型上部边缘处两测点,记为测点A'、B'。由于模拟中所用的岩石和炸药参数无法与试验完全一致,两者振速数据亦有差异,因此只对比分析模拟与试验振动合速度峰值的变化趋势。模拟测点选取位置如图10所示。

将模型试验实测振动数据与数值模拟测点振速数据对比。由图11可以看出,岩石模型内部介质连续均匀,试验及相应模拟测点振动合速度峰值基本一致。数值模拟与模型试验得到的曲线变化规律具有较好的一致性,说明在其他爆破参数保持一致的情况下,改变空孔直径对振动合速度峰值的影响是一致的。

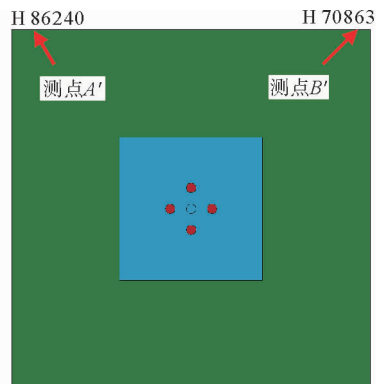


图10 模拟所选取测点位置

Fig. 10 Simulation of the selected measuring point position

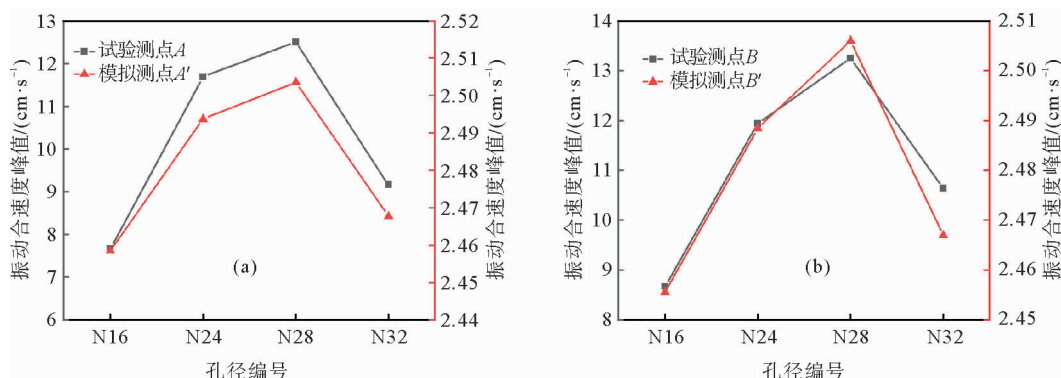


图11 模拟与试验振速对比

Fig. 11 Comparison of test and simulated vibration velocity

## 3 结论

1) 施加围压对振动合速度峰值到达时间影响较小,当进行到爆炸后期,施加围压产生初始应力对爆破振动的影响表现为速度时程曲线上的不同步性。

2) 模型试验与数值模拟对比分析表明,围压条件下掏槽爆破中不同空孔直径对爆破振动合速度有较大影响,二者呈非线性关系,振动合速度峰值随空孔直径的增大呈现先增大后减小的趋势。空孔直径在1~1.75倍炮孔直径区间,增大空孔直径可以更好地利用空孔的自由面效应产生反射拉伸波,破岩效果较好,引起的爆破振动随之增大;空孔直径为2倍炮孔直径时,空孔的应力集中效应大幅减弱、自由面效应过强,会使得大量爆生气体从空孔逸出,用于破碎岩石的能量减少,引起的爆破振动减小。

3) 改变空孔直径可以改变爆破振动信号频带能量分布,空孔直径采用1倍和2倍炮孔直径时,爆破振动信号能量中低频带能量占比减少,能量有向中高频移动的趋势,可以有效降低直眼掏槽爆破振动效应,有利深部巷道的安全快速掘进。

### 参考文献:

- [1] 杨建华,孙文彬,姚池,等.高地应力岩体多孔爆破破岩机制[J].爆炸与冲击,2020,40(7):118-127.  
YANG Jianhua,SUN Wenbin,YAO Chi,et al.Mechanism of rock fragmentation by multi-hole blasting in highly-stressed rock masses[J].Explosion and Shock Waves,2020,40(7):118-127.
- [2] 张召冉,陈华义,矫伟刚,等.含空孔直眼掏槽空孔效应及爆破参数研究[J].煤炭学报,2020,45(增2):791-800.  
ZHANG Zhaoran,CHEN Huayi,JIAO Weigang,et al.Rock breaking mechanism and blasting parameters of straight-hole



- cutting with empty-hole[J].Journal of China Society,2020,45(S2):791-800.
- [3] 李桐,陈明,叶志伟,等.不同耦合介质爆破爆炸能量传递效率研究[J].爆炸与冲击,2021,41(6):4-14.  
LI Tong,CHEN Ming,YE Zhiwei,et al.Study on the energy transfer efficiency of explosive blasting with different coupling medium[J].Explosion and Shock Waves,2021,41(6):4-14
- [4] MENG N K,BAI J B,CHEN Y,et al.Damage evolution mechanisms of rock induced by blasting with the aid of empty-hole effect[J].Energies,2020,13(3):756.
- [5] 李启月,吴正宇,黄武林.直眼掏槽空孔效应的计算模型改进与分析[J].采矿与安全工程学报,2018,35(5):925-930.  
LI Qiyue,WU Zhengyu,HUANG Wulin.Improvement and analysis of calculation model for empty hole effect in parallel cut [J].Journal of Mining & Safety Engineering,2018,35(5):925-930.
- [6] 皇新宇,纪强,张宪堂,等.地应力作用下四孔掏槽爆破破岩机理数值模拟研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2022,41(2):60-69.  
HUANG Xinyu,JI Qiang,ZHANG Xiantang,et al.Numerical simulation research on rock breaking mechanism of four-hole cut blasting under ground stress[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2022,41(2):60-69.
- [7] JAYASINGHE L B,SHANG J L,ZHAO Z Y,et al.Numerical investigation into the blasting-induced damage characteristics of rocks considering the role of in-situ stresses and discontinuity persistence[J/OL].Computers and Geotechnics,2019,116.DOI:10.1016/j.compgeo.2019.103207.
- [8] 王海亮,高尚,张海义.高地应力岩石双孔爆破损伤演化研究[J].工程爆破,2022,28(2):1-6.  
WANG Hailiang,GAO Shang,ZHANG Haiyi.Research on damage evolution of rock caused by double-hole blasting under high in-situ stress[J].Engineering Blasting,2022,28(2):1-6.
- [9] 赵明生,朴志友,梁开水,等.爆破地震波时频域分析方法及应用[J].山东科技大学学报(自然科学版),2011,30(4):22-28.  
ZHAO Mingsheng,PIAO Zhiyou,LIANG Kaishui,et al.Method and application of blasting vibration signal time-frequency domain analysis[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2011,30(4):22-28.
- [10] 孙振,谢事臻,张宪堂,等.减震孔在小间距隧道爆破开挖中的降振效应[J].山东科技大学学报(自然科学版),2019,38(1):25-31.  
SUN Zhen,XIE Shizhen,ZHANG Xiantang,et al.Vibration reduction effect of damping holes in blasting excavation of tunnels with small spacing[J].Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2019,38(1):25-31.
- [11] 李强,李文明,韩晓亮,等.基于HHT法的出矿巷道爆破振动衰减规律研究[J].矿业研究与开发,2017,37(2):44-47.  
LI Qiang,LI Wenming,HAN Xiaoliang,et al.Research on blasting vibration attenuation law of ore-drawing roadway based on HHT method[J].Mining Research and Development,2017,37(2):44-47.
- [12] 宗琦.立井冻土掘进爆破参数模型试验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2004.  
ZONG Qi.Tunneling blasting parameters model experiment study on vertical well freezing soil[D].Hefei:University of Science and Technology of China,2004.
- [13] 马建军,黄宝,江兵,等.地下深孔爆破模拟相似律与模型制作[J].中国矿业,2001(4):40-43.  
MA Jianjun,HUANG Bao,JIANG Bing,et al.Manufacturing of model for simulating underground deep hole blasting based on the theory of similarity law[J].China Mining Magazine,2001(4):40-43.
- [14] 邹云屏,李潇.信号变换与处理[M].武汉:华中理工大学出版社,1993:8-12.
- [15] 凌同华,李夕兵.地下工程爆破振动信号能量分布特征的小波包分析[J].爆炸与冲击,2004,24(1):63-68.  
LING Tonghua,LI Xibing.The features of energy distribution for blast vibration signals in underground engineering by wavelet packet analysis[J].Explosion and Shock Waves,2004,24(1):63-68.
- [16] XIE L X,LU W B,ZHANG Q B,et al.Analysis of damage mechanisms and optimization of cut blasting design under high in-situ stresses[J].Tunnelling and Underground Space Technology,2017,66:19-33.
- [17] 李小刚,周先齐,杨杭澎,等.大跨度小净距隧道中夹岩爆破振动控制与损伤判别[J].隧道建设(中英文),2022,42(3):406-413.  
LI Xiaogang,ZHOU Xianqi,YANG Hangpeng,et al.Blasting vibration control and damage determination of interlaid rock in a tunnel with large spans and short distances[J].Tunnel Construction,2022,42(3):406-413.

(责任编辑:吕海亮)