

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.006

## 深部高地应力爆破振动质点 峰值速度变化特性数值模拟研究\*

尤元元<sup>1,2</sup>, 崔正荣<sup>1,2</sup>, 李二宝<sup>1,2</sup>

(1. 中钢集团 马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 马鞍山 243000 ;  
2. 马鞍山矿山研究院 爆破工程有限责任公司, 马鞍山 243000)

**摘要:** 高地应力环境是近年来深部矿山爆破开采困难的主要原因之一, 研究爆破荷载与高地应力的耦合作用下爆破振动的衰减机制, 是开展“深部高储能矿岩组合孔超前精准爆破技术”的前提。以深部单炮孔爆破作用下的岩体为研究对象, 设定开采深度分别为 1000 m、1500 m、2000 m、2500 m、3000 m 及无围压 6 种工况进行数值模拟及回归分析。结果表明: 不同地应力环境对爆破作用下深部岩体破碎近区单元速度峰值到达时间及基本走势没有影响; 随着地应力的加大, 在最大/最小主应力方向上均表现为对爆炸冲击波的抑制作用和对爆炸应力波的小幅促进作用。但在最大主应力方向上, 在炮孔近区由近至远范围变化中, 表现为地应力对爆炸冲击波的强抑制作用。在最小主应力方向上, 在炮孔远区由近至远范围变化中, 地应力对爆炸应力波的小幅促进作用。

**关键词:** 高地应力; 高储能矿岩; 质点峰值速度; 数值模拟; 回归分析

**中图分类号:** TD853 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)04-0036-07

## Numerical Simulation on Variation Characteristics of Blasting Vibration Particle Peak Velocity under High In-situ Stress

YOU Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, CUI Zheng-rong<sup>1,2</sup>, LI Er-bao<sup>1,2</sup>

(1. Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co Ltd, Maanshan 243000, China;  
2. Maanshan Institute of Mining Research Blasting Engineering Co Ltd, Maanshan 243000, China)

**Abstract:** High in-situ stress is one problem for the deep mine blasting. The attenuation mechanism of blasting vibration under the coupling action of blasting load and high in-situ stress is the premise of carrying out “advanced precise blasting technology of deep high energy storage ore and rock combination hole”. Taking the rock mass under the action of deep single hole blasting as the research object, the mining depth was set as 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m, 3000 m and without confining pressure for numerical simulation and regression analysis. The results show that different in-situ stress environment has no influence on the arrival time and basic trend of the unit velocity peak in the near deep rock fracture zone for blasting. With the increase of the stress, the inhibition of the explosion shock wave and the small promotion of the explosion stress wave are shown in the direction of maximum/minimum principal stress. However, in the direction of the maximum principal stress, in the range from near to far, the ground stress has a strong suppression effect on the blast wave. In the direction of the minimum principal stress, in the far region of the hole from near to far range variation, the ground stress has a small promoting effect on the explosion stress wave.

**Key words:** high ground stress; high energy storage mineral rock; particle peak velocity; numerical simulation; regression analysis

随着矿山开采逐步进入到深井采矿阶段,由于地应力环境的改变及爆破作用的复杂性,相关理论和技术还不够成熟和完善<sup>[1,2]</sup>,探究深部高围压环境下的岩石破碎区爆破荷载分布规律对于地下矿山爆破具有重要指导作用。国内外相关学者开展了相关研究工作<sup>[3-5]</sup>:张凤鹏进行了垂直炮孔方向的双向地应力场对裂纹扩展规律的影响分析,得出地应力的变化与裂纹区面积的定量关系;肖正学等通过分析对比室内试验和现场实例,研究发现初始应力场的存在改变了应力波的传播规律,并对爆破地震波的传播和裂纹发展起着导向作用;Ma 等利用 LS-DYNA 软件研究爆破裂纹扩展过程规律,分析了不同地应力对爆破裂纹扩展的影响。考虑到当前研究主要聚焦于爆破作用如高围压下爆炸应力波的传播或者爆生气体作用下爆破裂纹扩展过程研究、裂纹区面积变化等单向指标变化现象<sup>[6,7]</sup>。而从爆破岩石本身破坏环境出发,对爆破荷载与高地应力环境耦合作用爆破振动质点峰值速度变化特性研究的比较少。通过数值模拟,选取矿石开采深度分别为 1000 m、1500 m、2000 m、2500 m、3000 m 时的 5 种围压加载方案和无围压作用下 6 种工况情况对不同围压下炮孔周围岩石破碎近区爆破荷载与高地应力环境耦合作用下爆破振动质点峰值速度变化特性进行研究,对比分析了不同围压条件及最大、最小主应力对爆破振动质点峰值速度变化特性。

## 1 数值模拟

### 1.1 数值模型的建立

深部高围压条件下岩石爆破数值模型由 ANSYS/LS-DYNA 显示动力分析有限元软件建立。该

模型由炸药,岩石和用于炸药流动的 ALE 空间组成。岩体的应力初始化通过动力松弛法增加阻尼将动能降为零,从而实现 LS-DYNA 显示求解器进行不同地应力的加载。为尽可能的接近实际爆破环境及方便加压和后续数值计算,设计模型尺寸为 15 m × 15 m × 4 m,炮孔位于几何中心,不设填塞,炮孔直径为 0.076 m,采用中心起爆<sup>[8,9]</sup>。

### 1.2 计算力学参数选择

为避免由于计算中网格过分畸变造成计算结果的不准确,本次模拟采用流固耦合方法,空气材料网格和岩石材料网格耦合,组成双层网格<sup>[10,11]</sup>。通过 ALE 多物质材料输送算法使炸药材料能在整个网格域流动,岩石材料采用 Lagrange 网格描述,模型关键字为: \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC,岩石各项材料参数见表 1。

表 1 岩石材料参数

Table 1 Physical and mechanic parameters of rock

质量密度/ (g · cm <sup>-3</sup> )	杨氏模量/ (N · m <sup>-2</sup> )	泊松比	屈服应力/ (N · m <sup>-2</sup> )	切线模量/ (N · m <sup>-2</sup> )
2600	55	0.27	1.6 × 10 <sup>8</sup>	3.93 × 10 <sup>7</sup>

炸药采用 Euler 网格描述,模型关键字 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN,各主要材料参数见表 2。

状态方程采用下式描述<sup>[12]</sup>

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

式中:  $P$  为爆轰压力;  $V$  为相对体积;  $E$  为单位体积内能; 参数  $\rho_e$ 、 $D_1$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\bar{\omega}$  为试验选定的材料常数。

表 2 炸药各主要材料参数

Table 2 Main material parameters of explosives

材料	$\rho_e$ / (g · cm <sup>-3</sup> )	$D_1$ / (m · s <sup>-1</sup> )	$A$ / (G · Pa <sup>-1</sup> )	$B$ / (G · Pa <sup>-1</sup> )	$P_{CJ}$	$R_1$	$R_2$	$\bar{\omega}$	$E$ / (GJ · m <sup>-3</sup> )
TNT	1.630	6930	373.8	3.747	7.4 × 10 <sup>9</sup>	4.15	0.9	0.35	9.6

### 1.3 围压加载

为研究不同围压下地下岩石破碎区荷载分布规

律及单元速度效应,选择岩石无围压状态和开采深度  $H$  分别为 1000 m、1500 m、2000 m、2500 m、3000 m 的地应力六种工况对待解决问题进行研究。考虑到深部地应力环境的复杂性,选用美国学者 B C Haimson 基于水压致裂法总结的地应力计算公式进行加压。

B C Haimson 地应力计算公式<sup>[13,14]</sup>。

$$\sigma_H = 7.5 + 0.024H \quad (2)$$

$$\sigma_h = 2.0 + 0.016H \quad (3)$$

收稿日期:2020-07-14

作者简介:尤元元(1993-),男,河南南阳人,在读硕士研究生,研究方向为采矿及爆破技术研究,(E-mail)990925905@qq.com。

通讯作者:崔正荣(1975-),男,山东日照人,正高级工程师、硕士生导师,主要从事采矿及爆破技术研究,(E-mail)cuiizr2005@126.com。

基金项目:“十三五”国家重点研发计划课题——深部高储能矿岩组孔超前致裂精准爆破技术(\*2017YFC0602902)

$$\sigma_{avg} = 5.0 + 0.02H \quad (4)$$

式中： $\sigma_H$  为最大水平主应力； $\sigma_h$  为最小水平主应力； $\sigma_{avg}$  为平均水平主应力。

考虑到 LS-DYNA 应力初始化的特点，在加载曲线关键字 \* DEFINE\_CURVE 中设置 SFO 为 100，五种加压方案中最大水平主应力加速度、最小水平主应力加速度、平均水平主应力加速度的具体参数见下表 3。

表 3 五种加压方案参数

Table 3 Five pressurization program parameters

方案	开采深度 H/m	最大水平主应力加速度 $a_{\sigma_H} / \left( \frac{m}{s^2} \right)$	最小水平主应力加速度 $a_{\sigma_h} / \left( \frac{m}{s^2} \right)$	平均水平主应力加速度 $a_{\sigma_{avg}} / \left( \frac{m}{s^2} \right)$
1	1000	30.29	17.31	24.04
2	1500	41.83	25.00	33.65
3	2000	53.57	32.69	43.27
4	2500	64.90	40.38	52.88
5	3000	76.44	48.07	62.50

设定最小水平主应力  $\sigma_h$  施加在 X 方向，最大水平主应力  $\sigma_H$  施加在 Y 方向，采用一侧加压，另一侧设置固定位移边界来模拟实际地应力环境<sup>[15,16]</sup>，力学简化模型见下图 1。

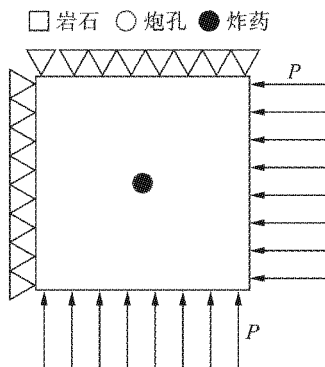


图 1 力学简化模型

Fig. 1 Simplified mechanical model

## 2 高地应力与爆破荷载耦合作用下爆破振动速度变化规律研究

在矿山岩石爆破工程方面，质点振动速度是评价岩石损伤破坏程度的重要指标之一<sup>[17-19]</sup>。但由于爆破质点破坏本身影响因子的复杂性及不确定性，通常将质点速度峰值作为质点破坏与否的有效判据。为研究爆破荷载与高地应力综合作用下爆破质点峰值速度的变化特性，提取数值计算模型中单元测点速度-时间各节点数据和各测点速度峰值

PPV 进行对比分析研究；推导不同围压工况及最大、最小主应力方向炮孔周围岩石爆破荷载与地应力耦合作用下质点峰值速度变化特性。

### 2.1 目标选定

为方便计算结果数据提取，参考 Williamson 在处理爆破荷载下钢筋混凝土桥梁柱响应的处理方法<sup>[20,21]</sup>，在本次数值模型中以炮孔为中心，以单元为研究单位，将炮孔周围近区岩体以同心“方框”和分别沿最大、最小主应力方向的直线进行分组研究。为方便分析，本研究共选取炮孔周边 2m 范围内 440 个单元分组研究（冲击波作用范围为 3~7 倍药包半径即范围③~⑦之间）。选取参考同心“方框”10 个（以不同颜色示意），分别编号为①~⑩；参考直线 2 条，分别编号为 I、II；测点共 480 个，并按照下图 2 所示进行分组编号处理。

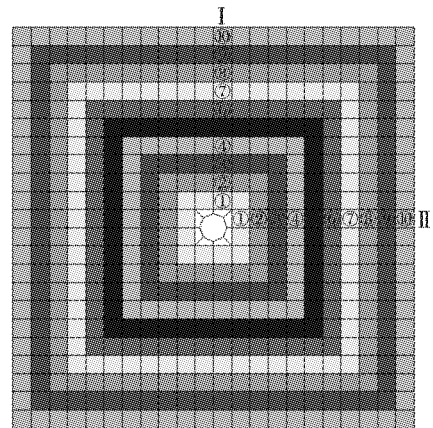


图 2 测点位置模型

Fig. 2 Measurement point position model

### 2.2 不同地应力下质点速度效应研究

图 3~图 8 分别列举了参考线 I、II 上同编号测点①、③、⑦号测点振动速度-时间图像。由图可知：不同的加压条件下炮孔周围岩石近区（①~⑩）单元速度-时间曲线大致趋势相同，随着距离炮孔距离加大振动速度减小，单元速度-时间曲线波动差距随之加大，但所有时刻质点峰值速度的到达时间不受影响。

### 2.3 最大、最小主应力方向质点振动峰值研究

为进一步研究深部高围压环境对爆破质点速度峰值 PPV 的影响机理，提取参考线 I、II 上 20 个测点的振动质点峰值速度数据，在不同的围压条件下进行对比研究，如图 9、10。

分析图像数据可知：随着围压的逐渐加大，在炮孔周围岩石爆破近区最大、最小主应力方向上单元测点速度峰值都经历由最初的逐渐减小到后来的逐

步增大的过程。在岩体爆破破碎范围测点  $X = \textcircled{1} \sim \textcircled{4}$  范围内,岩体首先受到炸药爆炸产生的冲击波作用发生压剪损伤,且随着围压增大,冲击波作用下的岩体损伤破坏单元速度峰值逐步减小。冲击波向外进一步传播逐渐衰减为应力波,此时应力波所产生的对岩体的压剪作用逐步减小,直至不能造成对岩体的完全破碎,当应力波传播到测点  $X = \textcircled{4}$  时,岩体切向方向上产生的拉应力成为岩体破碎的主要作用来源,随着围压的加大,应力波在岩体切向上产生的拉应力显现逐渐增大的趋势,表明随着地应力的加大,在最大/最小主应力方向上均表现为对爆炸冲击波的强抑制作用和对爆炸应力波的小幅促进作用。

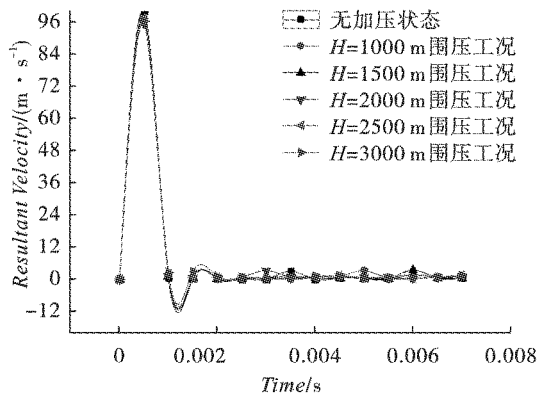


图3 I-①号测点爆破单元速度-时间图像  
Fig. 3 I-① Point blasting unit speed-time image

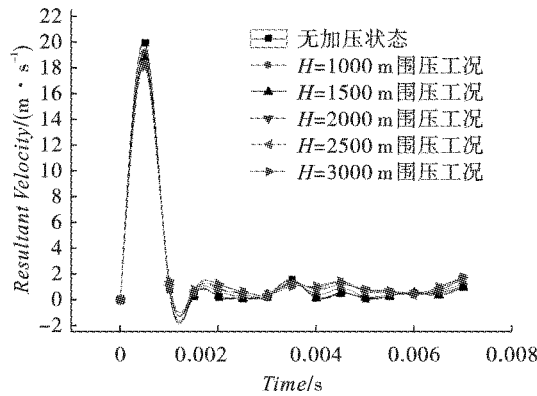


图4 I-③号测点爆破单元速度-时间图像  
Fig. 4 I-③ Point blasting unit speed-time image

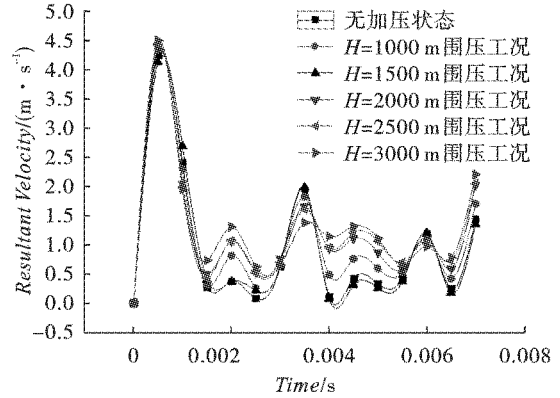


图5 I-⑦号测点爆破单元速度-时间图像  
Fig. 5 I-⑦ Point blasting unit speed-time image

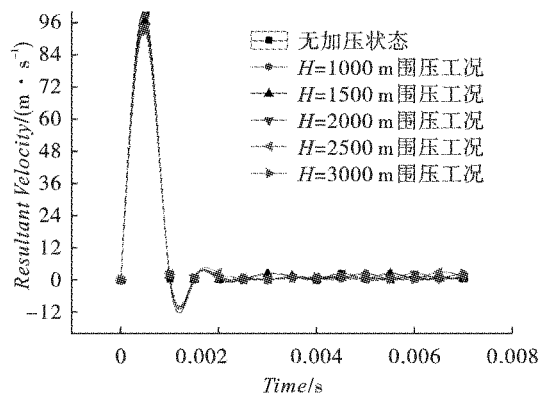


图6 II-①号测点爆破单元速度-时间图像  
Fig. 6 II-① Point blasting unit speed-time image

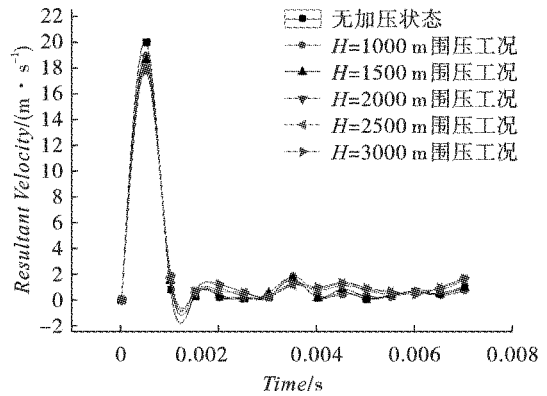


图7 II-③号测点爆破单元速度-时间图像  
Fig. 7 II-③ Point blasting unit speed-time image

#### 2.4 不同地应力对质点峰值速度影响规律

为进一步验证上述数值计算结果的可靠性,研究不同地应力对爆破振动质点峰值速度的微观变化特性的影响,对 I、II 号参考线不同地应力下炮孔周围岩体爆炸冲击破作用时和爆炸应力波耦合作用时爆破单元速度峰值应用最小二乘法原理进行曲线拟合,得出 20 个测点在六种围压工况下的拟合曲线参数(拟合公式  $y = a - bc^x$ ),见表 4、5。

通过对比分析爆炸不同地应力下冲击波和爆炸应力波作用下炮孔周围岩体测点速度峰值拟合曲线参数可知:拟合公式具有非常高的相关系数,并且由拟合公式  $y = a - bc^x$  分别对应的常数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分析得出,测点距离炮孔从①至④越来越远范围变化中,岩体单元振动速度拟合公式呈单调递减趋势,测点距离炮孔从⑤至⑩越来越远范围变化中,岩体单元振动速度拟合公式呈单调递增趋势。

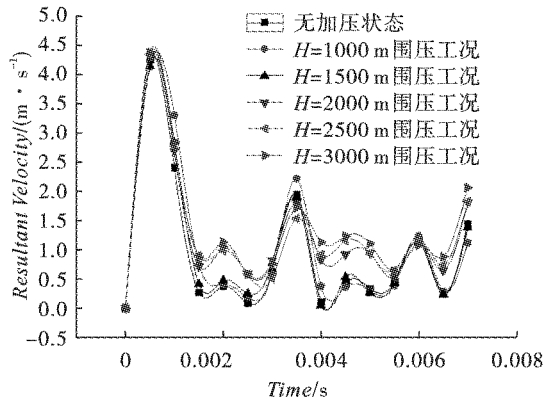


图8 II-⑦号测点爆破单元速度-时间图像

Fig. 8 II-⑦Point blasting unit speed-time image

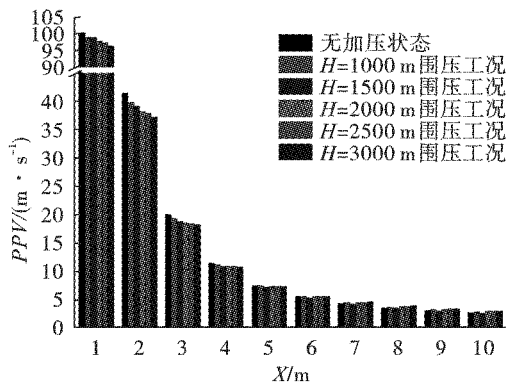


图9 I号参考线各测点爆破单元速度峰值图像  
Fig. 9 I Line blasting unit of each measuring point velocity peak value of reference image

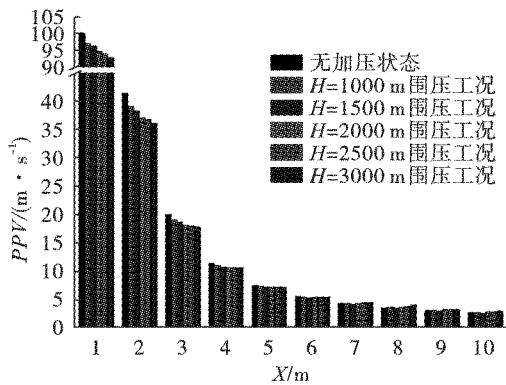


图10 II-号参考线各测点爆破单元速度峰值图像  
Fig. 10 II-Number line blasting unit of each measuring point velocity peak value of reference image

最大主应力方向爆炸冲击波作用范围内的岩体单元速度衰减指数  $c$  从①号点的 0.98848 过渡到④号点的 0.39945, 最小主应力方向爆炸冲击波作用范围内的岩体单元速度衰减指数  $c$  从①号点的 0.73014 过渡到④号点的 0.55428, 表明测点距离炮孔从①至④越来越远范围变化中, 爆炸冲击波随着地应力的加大, 最大主应力方向比最小主应力方向

爆炸冲击波曲线衰减具有更高的敏感性; 最大主应力方向爆炸应力波作用范围内的岩体振动速度增长指数  $c$  从⑤号点的 0.14479 过渡到⑩号点的 0.31788, 最小主应力方向爆炸应力波作用范围内的岩体单元速度增长指数  $c$  从⑤号点的 0.04438 过渡到⑩号点的 0.3723, 表明测点距离炮孔从⑤至⑩越来越远范围变化中, 爆炸应力波随着地应力的加大, 最小主应力方向比最大主应力方向曲线爆炸冲击波曲线增长具有更高的敏感性。表明随着地应力的加大, 在最大/最小主应力方向上均表现为对爆炸冲击波的强抑制作用和对爆炸应力波的小幅促进作用。

表4 爆炸冲击波作用测点 PPV 拟合曲线

Table 4 PPV fitting curve of measuring points under the action of blast wave

测点	$a$	$b$	$c$	$R^2$
I-①	36.48638	-64.30240	0.98848	0.92792
I-②	36.51893	-6.90468	0.70579	0.98214
I-③	17.96176	-3.21360	0.63676	0.99548
I-④	10.73420	-1.57659	0.39945	0.97365
II-①	91.41714	-11.79149	0.73014	0.95620
II-②	35.49919	-8.88835	0.66150	0.98077
II-③	17.55349	-3.87348	0.63254	0.99203
II-④	10.47435	-1.62790	0.55428	0.99353

表5 爆炸应力波作用测点 PPV 拟合曲线

Table 5 PPV fitting curve of explosive stress wave measuring point

测点	$a$	$b$	$c$	$R^2$
I-⑤	7.30641	1.37526	0.14479	1
I-⑥	5.54881	1.27041	0.24309	0.99128
I-⑦	4.49944	1.32089	0.28091	0.98789
I-⑧	3.81525	1.37546	0.29926	0.98705
I-⑨	3.33200	1.41568	0.31014	0.98710
I-⑩	2.96107	1.43611	0.31788	0.98757
II-⑤	7.15649	1.38764	0.04438	0.95999
II-⑥	5.41665	0.63443	0.27030	0.99021
II-⑦	4.37633	0.72226	0.32556	0.98543
II-⑧	3.70252	0.77276	0.36581	0.92904
II-⑨	3.21789	0.84594	0.36222	0.98553
II-⑩	2.84841	0.87644	0.37230	0.98672

### 3 结论

基于 LS-DYNA 程序对深部岩体开采深度 1000 m、1500 m、2000 m、2500 m、3000 m 和无围压加载六种工况条件下岩体爆破振动速度情况开展数值模拟研究, 综合对比分析不同的地应力环境和同一地应力水平下最大、最小主应力方向爆破振动速

度的情况,得出高地应力环境对岩体爆破荷载对爆破振动速度变化特性的影响,主要结论如下:

(1)不同的加压条件下炮孔周围岩石近区(①~⑩)质点振动破坏-时间曲线大致趋势相同,随着距离炮孔距离加大,单元速度-时间曲线波动差距随之加大,但所有时刻单元速度峰值的到达时间不受影响。

(2)随着地应力的加大,在最大/最小主应力方向上均表现为对爆炸冲击波的强抑制作用和对爆炸应力波的小幅促进作用。

(3)测点距离炮孔从①至④越来越远范围变化中,爆炸冲击波随着地应力的加大,曲线衰减具有更高的敏感性;测点距离炮孔从⑤至⑩越来越远范围变化中,爆炸应力波随着地应力的加大,曲线增长具有更高的敏感性。

### 参考文献(References)

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005(16):2803-2813.
- [1] HE Man-chao, XIE He-ping, PENG Su-ping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(16):2803-2813. (in Chinese)
- [2] 谢和平,彭苏萍,何满潮.深部开采基础理论与工程实践[M].北京:科学出版社,2006.
- [3] 杨立云,王青成,丁晨曦,等.深部岩体中切槽爆破机理实验分析[J].振动与冲击,2020,39(2):40-46.
- [3] YANG Li-yun, WANG Qing-cheng, DING Chen-xi, et al. Experimental analysis on the mechanism of slotting blasting in deep rock mass[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(2):40-46. (in Chinese)
- [4] 李新平,吴泽民,罗忆,等.中深部大型地下洞室高边墙爆破振动高程效应研究[J].爆破,2019,36(1):1-5,43.
- [4] LI Xin-ping, WU Ze-min, LUO Yi, et al. Study on blasting vibration altitude effect of high-sidewalls in deep large underground cavern[J]. Blasting, 2019, 36(1):1-5, 43. (in Chinese)
- [5] 张凤鹏,彭建宇,张鑫,等.地应力对岩体爆破影响的数值模拟[J].金属矿山,2015(12):15-18.
- [5] ZHANG Feng-peng, PENG Jian-yu, ZHANG Xin, et al. Numerical simulation of the effect of in-situ stress on rock blasting[J]. Metal Mine, 2015(12):15-18. (in Chinese)
- [6] 肖正学,张志呈,李瑞明.初始应力场对爆破效果的影响[J].煤炭学报,1996(5):51-55.
- [6] XIAO Zheng-xue, ZHANG Zhi-cheng, LI Rui-ming. Influence of initial stress field on blasting effect[J]. Journal of China Coal Society, 1996(5):51-55. (in Chinese)
- [7] XIA Yu-qing, JIANG Nan, ZHOU Chuan-Bo, et al. Safety assessment of upper water pipeline under the blasting vibration induced by Subway tunnel excavation[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 49:626-642.
- [8] G W Ma, X M Aa. Numerical simulation of blasting-induced rock fractures[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 70:966-975.
- [9] 白羽,朱万成,魏晨慧,等.不同地应力条件下双孔爆破的数值模拟[J].岩土力学,2013,34(S1):466-471.
- [9] BAI Yu, ZHU Wan-cheng, WEI Chen-Hui, et al. Numerical simulation on two-hole blasting under different in-situ stress conditions[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1):466-471. (in Chinese)
- [10] 谢源.高应力条件下岩石爆破裂纹扩展规律的模拟研究[J].湖南有色金属,2002(4):1-3.
- [10] XIE Yuan. The modelling experiment for regularity of blasting crackle spread of rock under high stress conditions[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2002(4):1-3. (in Chinese)
- [11] 吕进国,李守国,赵洪瑞,等.高地应力条件下高压空气爆破卸压增透技术实验研究[J].煤炭学报,2019,44(4):1115-1128.
- [11] LU Jin-guo, LI Shou-guo, ZHAO Hong-rui, et al. Technology of pressure relief and permeability enhancement with high pressure air blasting under high geo-stress[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4):1115-1128. (in Chinese)
- [12] 袁伟,金解放,梁晨,等.围压下混凝土动态损伤与能量耗散特征数值分析[J].有色金属科学与工程,2017,8(4):98-104.
- [12] YUAN Wei, JIN Jie-fang, LIANG Chen, et al. Numerical analysis of dynamic damage and energy dissipation characteristics of concrete under confining pressure[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(4):98-104. (in Chinese)
- [13] 谢和平.深部岩体力学与开采理论研究进展[J].煤炭学报,2019,44(5):1283-1305.
- [13] XIE He-ping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5):1283-1305. (in Chinese)
- [14] 李新平,宋凯文,罗忆,等.高地应力对掏槽爆破及爆破应力波影响规律的研究[J].爆破,2019,36(2):13-18,53.
- [14] LI Xin-ping, SONG Kai-wen, LUO Yi, et al. Study on influence of high in-situ stress on cut blasting and blast waves[J]. Blasting, 2019, 36(2):13-18, 53. (in Chinese)
- [15] 康红普,伊丙鼎,高富强,等.中国煤矿井下地应力数据库及地应力分布规律[J].煤炭学报,2019,44(1):23-33.
- [15] KANG Hong-pu, YI Bing-ding, GAO Fu-qiang, et al. Da-

- tabase and characteristics of underground in-situ stress distribution in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 23-33 (in Chinese)
- [16] 洪志先, 郭超, 熊宏武, 等. 侧压系数对不耦合装药爆破影响数值模拟研究[J]. 爆破, 2019, 36(3): 65-75, 89.
- [16] HONG Zhi-xian, GUO Chao, XIONG Hong-wu, et al. Numerical study of impact of lateral pressure coefficient on decoupling charge blasting[J]. Blasting, 2019, 36(3): 65-75, 89. (in Chinese)
- [17] 唐海, 李海波, 周青春, 等. 预裂爆破震动效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2277-2284.
- [17] TANG Hai, LI Hai-bo, ZHOU Qing-chun, et al. Experimental study of vibration effect of presplit blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2277-2284. (in Chinese)
- [18] 唐明渊, 周建敏, 余红兵, 等. 爆破振动对不同埋深采空区稳定性影响研究[J]. 爆破, 2017, 34(3): 140-144.
- [18] TANG Ming-yuan, ZHOU Jian-min, YU Hong-bing, et al. Influenced of blasting vibration on stability analysis of different depths of mined-out areas[J]. Blasting, 2017, 34(3): 140-144. (in Chinese)
- [19] WILLIAMSON E B, BAYRAK O, CARRIE D, et al. Performance of bridge columns subjected to blast loads. II: results and recommendations[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(6): 703-710.
- [20] 徐世达. 深部采场开采扰动下巷道围岩松动圈演化规律研究[J]. 金属矿山, 2019(11): 14-19.
- [20] XU Shi-da. Study on the loosen zone evolution of roadway surrounding rock under mining disturbance[J]. Metal Mine, 2019(11): 14-19. (in Chinese)
- [21] 张玉琦, 蒋楠, 周传波, 等. 地铁基坑爆破振动作用邻近高层框架建筑物结构动力响应[J]. 煤炭学报, 2019, 44(S1): 118-125.
- [21] ZHANG Yu-qi, JIANG Nan, ZHOU Chuan-bo, et al. Dynamic response of building structures with high-rise frames caused by blasting vibration at adjacent subway foundation pit[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(S1): 118-125. (in Chinese)

英文编辑: 柯波

(上接第 9 页)

- [54] 宋金波, 董宏丽, 刘霞, 等. 疫情下高校在线教育教学模式探索[J]. 科教文汇(上旬刊), 2020(9): 51-52.
- [54] SONG Jin-bo, DONG Hong-li, LIU Xia, et al. Exploration of online education and teaching models in colleges and universities under the epidemic[J]. Science, Education and Culture Collection(1st issue), 2020(9): 51-52. (in Chinese)
- [55] 李乐. 新冠肺炎疫情背景下的高校在线教学的特点及影响[J]. 教育教学论坛, 2020(40): 5-6.
- [55] LI Le. The characteristics and impact of online teaching in colleges and universities under the background of the new crown pneumonia epidemic[J]. Education Teaching Forum, 2020(40): 5-6. (in Chinese)
- [56] 李铁军. 国内高校“直播+教育”的现状、困境与路径探索[J]. 传媒, 2020(17): 82-84.
- [56] LI Tie-jun. The status quo, predicament and path exploration of "live broadcast + education" in domestic colleges and universities[J]. Media, 2020(17): 82-84. (in Chinese)
- [57] 杨天啸, 雷静. 在线教育的理论基础与发展趋势[J]. 教育研究, 2020, 41(8): 30-35.
- [57] YANG Tian-xiao, LEI Jing. Theoretical basis and development trend of online education[J]. Educational Research, 2020, 41(8): 30-35. (in Chinese)
- [58] 王辞晓, 杨钊, 尚俊杰. 高校在线教育的发展脉络、应用现状及转型机遇[J]. 现代教育技术, 2020, 30(8): 5-14.
- [58] WANG Ci-xiao, YANG Po, SHANG Jun-jie. Development context, application status and transformation opportunities of online education in colleges and universities[J]. Modern Educational Technology, 2020, 30(8): 5-14. (in Chinese)
- [59] 赵杰. 视频 APP 引发的微课碎片化学习思考[J]. 陕西教育(教学版), 2020(9): 16.
- [59] ZHAO Jie. Thoughts on the fragmented learning of micro-classes triggered by video APP[J]. Shanxi Education (Teaching Edition), 2020(9): 16. (in Chinese)
- [60] 郭颢. 试金石与催化剂——由疫情时期看教育信息化建设[J]. 黑龙江教师发展学院学报, 2020, 39(9): 80-82.
- [60] GUO Hao. Touchstones and Catalysts: Looking at the Construction of Educational Informationization from the Epidemic Period[J]. Journal of Heilongjiang Teachers Development Institute, 2020, 39(9): 80-82. (in Chinese)
- [61] 肖云, 王骥. 高校在线教学质量评价体系: 价值取向与建设策略[J]. 黑龙江高教研究, 2020, 38(10): 141-144.
- [61] XIAO Yun, WANG Ji. Online teaching quality evaluation system in colleges and universities: value orientation and construction strategy[J]. Heilongjiang Higher Education Research, 2020, 38(10): 141-144. (in Chinese)

英文编辑: 赵亮