

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.04.009

爆破作用下影响矿柱稳定性的多因素联合分析*

胡刚^① 费鸿禄^① 郭玉新^② 王振达^③

^①辽宁工程技术大学爆破技术研究院(辽宁阜新,123000)

^②包头市泉山爆破工程有限责任公司(内蒙古包头,014060)

^③华域建筑设计有限公司(辽宁沈阳,110170)

[摘要] 为了保证爆破载荷下矿柱的稳定性,采用现场监测试验和数值模拟分析相结合的方法,基于 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件建立了矿体开采模型。通过对比试验与模拟的振速时程曲线,确定了数值模型的可靠性。研究爆破作用下矿柱的应力峰值和作用范围的变化规律,以及两者联合作用对矿柱稳定性的影响。结果表明:地下矿山采用平行排列布孔进行爆破施工时,矿柱受水平方向振动作用强烈;当矿柱与爆源的距离小于 10 m 时,矿柱的拉应力峰值为 9.03 MPa,叠加空气冲击波的作用容易导致矿柱发生破坏;随着应力作用范围的递减,应力主要集中在矿柱的顶部或底部。建议保留矿柱为双曲面型,且增加矿柱的防护。

[关键词] 爆破;矿柱;应力;稳定性;数值模拟;房柱采矿法

[分类号] TD235

Combined Analysis of Multiple Factors Affecting the Stability of Pillars under Blasting Loads

HU Gang^①, FEI Honglu^①, GUO Yuxin^②, WANG Zhenda^③

^①Institute of Blasting Technique, Liaoning Technical University (Liaoning Fuxin, 123000)

^②Baotou Quanshan Blasting Engineering Co., Ltd. (Mongolia Baotou, 014060)

^③Huayu Architectural Design Co., Ltd. (Liaoning Shenyang, 110170)

[ABSTRACT] In order to ensure the stability of the pillar under blasting load, a mining model of the ore body was established using a combination of on-site monitoring experiments and numerical simulation analysis, based on ANSYS/LS-DYNA finite element software. The reliability of the numerical model was determined by comparing the vibration velocity time history curves of experiments and simulations. Variation laws of the peak stress and action ranges of the stress of the pillar under blasting loads were studied, as well as the combined effect of the two on the stability of the pillar. The results indicate that when parallel arrangement holes are used for blasting in underground mines, the pillars are strongly subjected to horizontal radial vibration. When the distance between the pillar and the explosion source is less than 10 m, the peak tensile stress of the pillar is 9.03 MPa, and the superposition of air shock waves can easily lead to the destruction of the pillar. With the decrease of stress range, the stress is mainly concentrated on the top or bottom of the pillar. It is recommended to keep the pillar in hyperbolic shape and increase the protection of the pillar.

[KEYWORDS] blasting; pillar; stress; stability; numerical simulation; room-pillar mining method

0 引言

房柱采矿法是我国金属、非金属矿山水平或缓倾斜矿体开采的主要施工方法^[1]。作为房柱采矿法的关键组成部分,矿柱的稳定性是维系矿山安全

生产的重要因素^[2]。

针对矿柱稳定性的问题,国内外学者进行了大量研究^[3-5]。刘洪强等^[6]运用断裂力学和突变理论建立了矿柱失稳模型,分析了空场法采矿时矿柱的破坏规律;李夕兵等^[7]采用 FLAC3D 有限差分程序分析了深部矿柱在承受高静载应力时的力学响应特

* 收稿日期:2022-09-18

第一作者:胡刚(1990-),男,博士,讲师,主要从事工程爆破方面的研究。E-mail:1125019679@qq.com

性;李小双等^[8]通过矿山压力平面应力相似模拟试验台,进行了房柱采矿法下矿柱稳定性及采场结构参数优化的相似试验;于清军等^[9]采用 Abaqus 数值模拟软件,分析了落矿冲击作用下矿柱的稳定性,并提出最佳设计方案;Jiang 等^[10]建立了矿柱的结构力学模型,确定了总能量的数学公式,推导了矿柱失稳时临界载荷的估算分析方法;熊晓勃等^[11]通过钽铁矿矿体开挖后的位移云图、塑性区分布云图等分析了矿柱的稳定性;Guo 等^[12]依据矿柱的应力演化数值模拟结果,揭示了动、静态应力诱发矿柱破裂的机理;王如坤等^[13]分析了矿柱分别在 20、30、40 MPa 静应力作用下塑性区的分布以及应力波扰动时的力学响应特性。

上述研究成果表明,影响矿柱稳定性的因素繁多。基于矿柱的爆破振动监测试验,采用数值模拟的方法,分析了矿柱应力峰值和作用范围的变化规律,及多因素联合作用对矿柱稳定性的影响。

1 工程概况

哈达门沟 1 号脉岩金矿位于内蒙古自治区包头市九原区,矿区平面布置如图 1 所示。矿区保有估计资源量:磁铁矿石 65 852 600 t、金矿石 2 577 625 t、金属金 15 294 kg、金属银 15 531 kg。

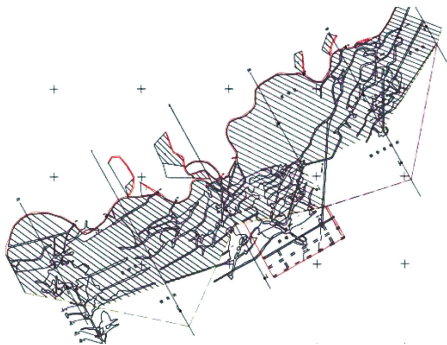


图 1 矿区平面图
Fig. 1 Planar of mining area

矿区矿体主要赋存于乌拉山岩群角闪斜长片麻岩内的蚀变石英-钾长石脉中,赋矿岩石为含金蚀变岩-石英脉、含金蚀变岩-石英钾长石脉。矿体地表长度 1 220 m,走向 330°,倾向 240°,平均倾角 32°,矿脉连续且呈舒缓波状延伸。

2 爆破振动监测试验

2.1 测点布置

采用房柱采矿法进行资源开采。该方法采准工

程量小,出矿产能较高。针对不同阶段多个矿房进行了数组爆破振动监测试验。以第 7 阶段 733 矿房第 1 组监测试验为例,测点布置如图 2 所示。

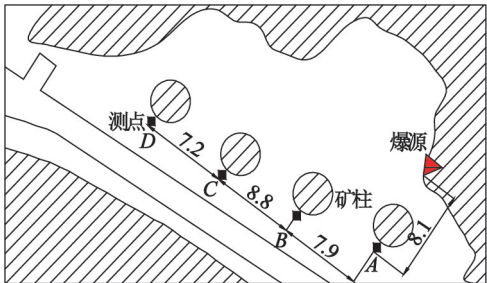


图 2 测点布置(单位:m)
Fig. 2 Layout of measuring points (Unit: m)

此次爆破振动监测试验中,共采用 4 台 TC-4850 测振仪(分别对应测点 A、B、C、D)。4 台仪器均布置在矿柱背爆侧底部,且定义 X 方向指向爆源,Z 方向垂直地面,Y 方向为矿体开采。测点 A 与爆源的距离为 8.1 m,测点 B、C、D 分别距离测点 A 7.9、16.7 m 和 23.9 m。

2.2 爆破参数

金矿第 7 阶段 733 矿房矿体开挖采用 2#岩石乳化炸药和半秒导爆管雷管,装药结构为反向连续不耦合装药,炮孔布置采用平行排列布孔方式,按照两孔一段进行爆破,如图 3 所示。

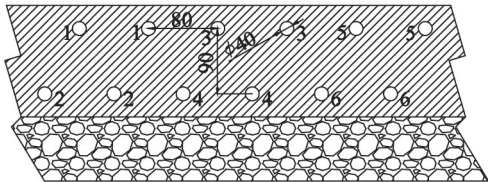


图 3 布孔方式(单位:mm)
Fig. 3 Arrangement of holes (Unit: mm)

采用 YSP-45 型凿岩机,按照梅花形设计炮孔:孔径为 40 mm,孔深为 2.7 m,炮孔间距为 80 mm,排距为 90 mm。单孔药量为 1.8 kg,总药量为 21.6 kg。装药长度为 1.9 m,填塞长度为 0.8 m。

2.3 监测数据

按照上述爆破参数进行矿体开采,可以获得测点的爆破振动监测数据,如表 1 所示。

从表 1 可知:爆破振动监测试验中,4 个测点 3 个方向的质点振速峰值均随爆心距的增加呈非线性衰减趋势。当爆心距大于 25 m 时,质点振速峰值均小于 1.0 cm/s;并且,同一测点 X 方向的质点振速峰值明显大于其他方向的质点振速峰值,说明地下矿山开采时,采用平行排列布孔导致水平方向的振动危害强于垂直方向的振动危害。

表 1 各测点处的爆破振速

Tab. 1 Blasting vibration velocity at each measuring point

| 测点编号 | 爆心距/m | 质点振速峰值/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$) | | | 质点振速峰值时刻/s | | |
|------|-------|--|------|------|------------|-------|-------|
| | | 监测试验 | | | 数值模拟 | | |
| | | X 方向 | Y 方向 | Z 方向 | X 方向 | X 方向 | X 方向 |
| A | 8.1 | 15.03 | 5.64 | 2.67 | 16.42 | 0.027 | 0.010 |
| B | 11.3 | 8.34 | 2.94 | 1.51 | 9.89 | 0.016 | 0.011 |
| C | 18.6 | 3.16 | 1.22 | 0.63 | 4.80 | 0.010 | 0.014 |
| D | 25.2 | 0.79 | 0.28 | 0.14 | 1.26 | 0.039 | 0.021 |

3 矿柱数值模拟分析

3.1 数值模型

采用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件,按照第 7 阶段 733 矿房实际比例建模^[14]。模型尺寸为 50 m×20 m×10 m。其中,矿柱为 $\phi 3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 的圆柱体,分别标为 I、II、III、IV。

数值模型如图 4 所示。

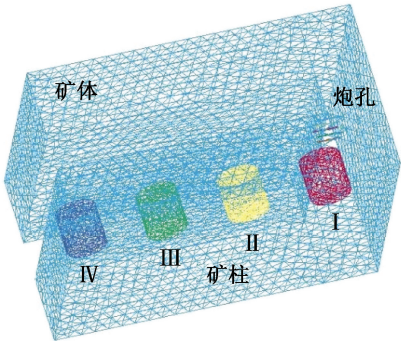


图 4 数值模型

Fig.4 Numerical model

为了提高计算精度以及缩短运算时间,将同段别炮孔合并,且设置炮孔的网格为 0.02 m,矿柱的网格为 0.10 m,矿体和空气的网格为 0.50 m。由于 733 矿房仅为矿山局部,所以数值模型需要设置无反射边界条件,且在模型顶面施加地应力,模型底面增加位移约束。采用 ALE 算法进行数值计算。

3.2 材料参数

根据 GB/T 50266—2013《工程岩体试验方法标准》^[15],对 733 矿房矿体进行取样、切割、打磨,测试力学参数,计算弹性模量和泊松比。矿柱和矿体材料采用 Plastic_Kinematic 模型。炸药同现场试验相同,为 2[#]岩石乳化炸药,采用 High_Explosive_Burn 模型,并定义 JWL 状态方程。空气材料采用 Null 模型,并定义 Linear_Polynomial 状态方程。

具体材料参数见表 2~表 4。表 3 中: ρ 为密

度; D 为爆速; p_{CJ} 为压力; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为常数; E_0 为初始内能。表 4 中, C_4 、 C_5 为常数。

表 2 矿柱和矿体的材料参数

Tab. 2 Material parameters of pillar and ore body

| 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 弹性模量/ GPa | 泊松比 | 屈服强度/ MPa |
|--|--------------|-----|--------------|
| 2 000 | 15 | 0.2 | 80 |

表 3 炸药的材料参数

Tab. 3 Material parameters of explosive

| ρ / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | D / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | p_{CJ} / GPa | A / Pa | B / Pa |
|---|---|-------------------|--------------------|----------------------|
| 1 000 | 3 200 | 5.4 | 2×10^{11} | 1.8×10^{10} |
| R_1 | R_2 | ω | E_0/Pa | |
| 4.2 | 0.9 | 0.15 | 4.2×10^9 | |

表 4 空气的材料参数

Tab. 4 Material parameters of air

| 密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) | 内能/ MPa | 相对体积 | C_4 | C_5 |
|--|------------|------|-------|-------|
| 1.29 | 0.25 | 1.0 | 0.4 | 0.4 |

3.3 可靠性验证

由于矿柱受 X 方向的爆破振动作用强烈,故选取同一测点的监测试验和数值模拟两种方法获得的 X 方向振速时程曲线进行对比分析,如图 5 所示。

图 5 结合表 1 可知:4 个测点的监测试验和数值模拟的 X 方向振速时程曲线均高度相似,振速产生突变的时刻也均出现在半秒导爆管雷管的起爆时间上;并且 4 个测点的振速峰值时刻均出现在首段别炮孔爆破之后,说明当炮孔爆破时,临空面增加,会减弱爆破振动对矿柱的影响,即当单段最大药量相同时,矿柱主要受初次段别爆破振动的影响。

由于模型材料均质、现场工况复杂、监测仪器误差等原因,两种方法下质点振速峰值或达到峰值的时刻未完全相同^[16],但是误差较小,说明数值模拟结果具有一定的可靠性。

3.4 矿柱应力云图

当矿体开采时,4 个矿柱 3 个方向的应力云图分别如图 6~图 9 所示。

从图 6 可知:爆破载荷作用下,I 矿柱 X 方向受

到拉应力,且拉应力贯通 I 矿柱 X 方向的迎爆侧面,拉应力峰值为 9.03 MPa,验证了矿柱主要受 X 方向爆破振动的影响;由于 I 矿柱距离爆源较近,产生大面积拉应力时除了考虑爆破振动的影响,还应该考

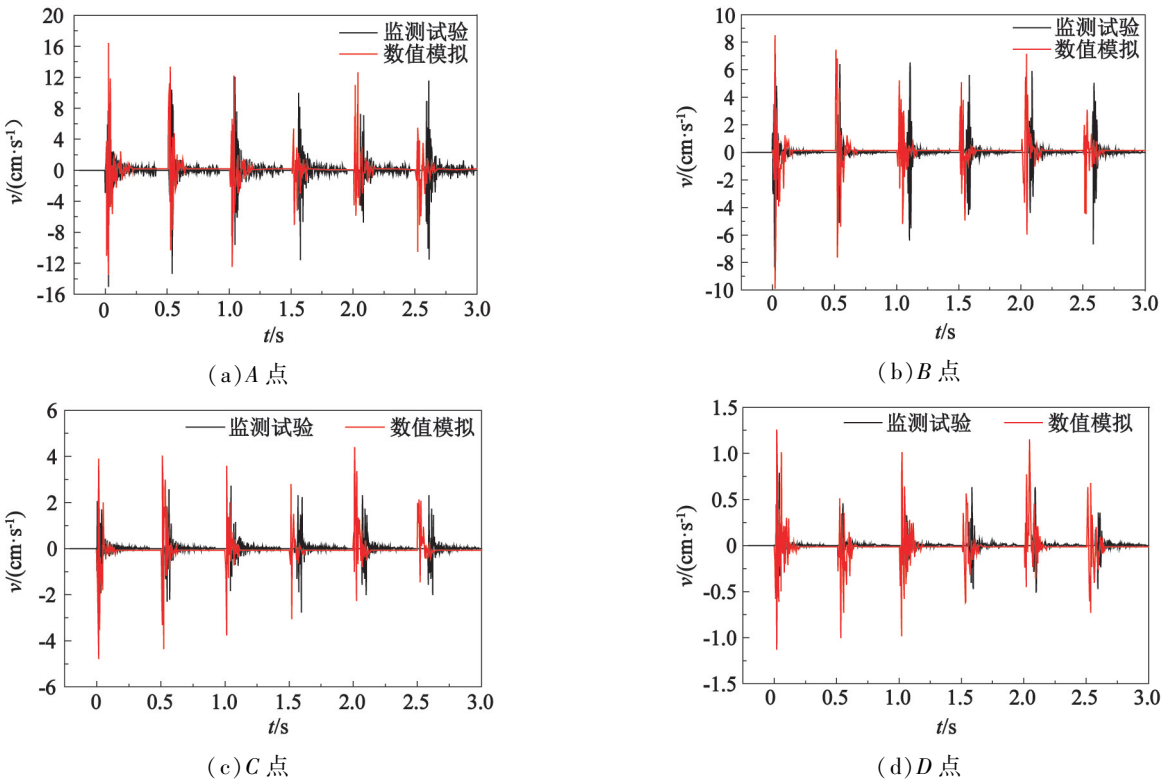


图 5 X 方向的振速时程曲线
Fig. 5 Vibration velocity time history curves in the X direction

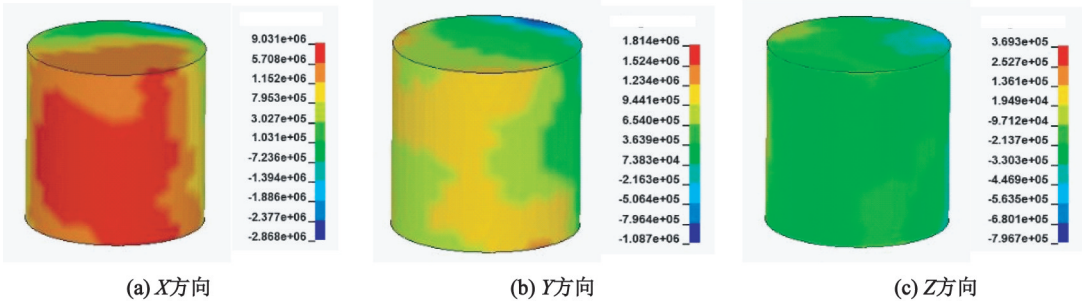


图 6 I 矿柱应力云图
Fig. 6 Stress contour of Pillar I

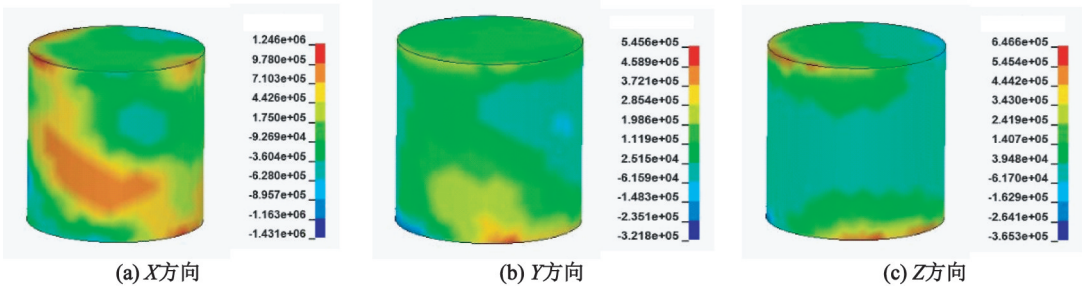


图 7 II 矿柱应力云图
Fig. 7 Stress contour of Pillar II

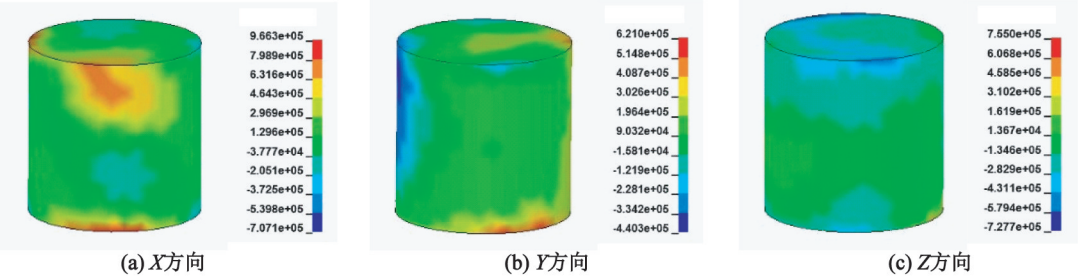


图 8 III 矿柱应力云图
Fig. 8 Stress contour of Pillar III

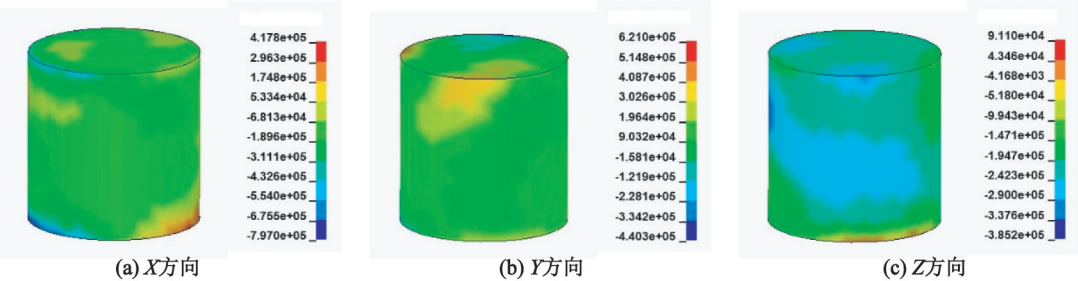


图 9 IV 矿柱应力云图
Fig. 9 Stress contour of Pillar IV

考虑空气冲击波的破坏作用;I 矿柱 Y 方向同样产生拉应力,但拉应力峰值有所衰减,降低至 1.81 MPa;I 矿柱 Z 方向仅在顶部产生部分压应力区,压应力峰值为 0.80 MPa。

从图 7 可知:爆破振动能量随着爆心距的增加有所衰减,II 矿柱 X 方向虽然受到拉应力作用,但是作用范围不再连续,仅出现在矿柱顶部、底部以及中心偏下位置,且拉应力峰值衰减至 1.25 MPa;II 矿柱 Y 方向也仅在底部产生拉应力,且拉应力峰值也有所衰减;II 矿柱 Z 方向不仅在顶部产生压应力区,底部也增加了部分压应力区。

从图 8 可知:III 矿柱 X 方向的拉应力作用范围和拉应力峰值继续衰减,仅在矿柱顶部和底部产生拉应力,且拉应力峰值衰减至 0.97 MPa;III 矿柱 Y 方向仅底部产生拉应力,但是 III 矿柱 Y 方向也产生了压应力区,说明距离爆源一定范围外,弱向爆破振动作用仍然能够对矿柱产生损伤效应;III 矿柱 Z 方向顶部的压应力作用范围有所增加。

从图 9 可知:IV 矿柱 X 方向仅底部产生拉应力,拉应力峰值甚至衰减至 0.42 MPa,但是底部也产生了压应力区;IV 矿柱 Z 方向的压应力作用范围继续增加,出现在矿柱顶部、底部以及中心位置,但是压应力峰值变化较小,为 0.39 MPa。

3.5 应力峰值规律

4 个矿柱的应力峰值变化规律如图 10 所示。

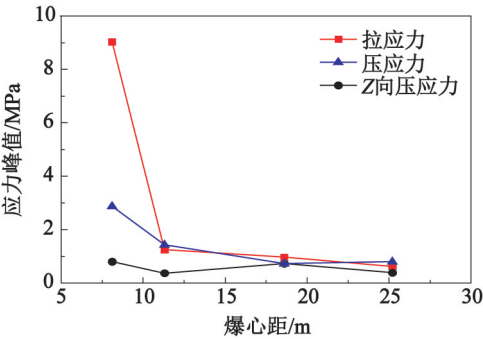


图 10 应力峰值的变化规律
Fig. 10 Variation laws of peak stress

从图 10 可知:矿柱的拉应力峰值随着爆心距的增加呈非线性衰减趋势,I 矿柱的拉应力峰值已经超过抗拉强度,导致矿柱发生破坏,但是当矿柱与爆源的距离大于 10 m 时,拉应力峰值急剧下降;矿柱的压应力峰值同样随爆心距增加呈非线性衰减,但影响矿柱稳定性的 Z 向压应力峰值却呈波浪型变化,且变化幅度较小。

3.6 应力作用范围

定义应力作用范围为:在应力峰值时刻,矿柱的拉应力或压应力作用区域与矿柱的表面积之比

$$R = \frac{S_n}{S} \times 100\% \quad (1)$$

式中: R 为应力作用范围; S_n 为应力作用区域; n 为 t (拉应力)或 c (压应力); S 为矿柱表面积。

从图 11 可知:当矿柱与爆源的距离增加时, X 向拉应力作用范围递减, Z 向压应力作用范围递增,且 10 m 为增减率陡变的分界线。结合图 7 ~ 图 9 可知,无论是拉应力还是压应力,当作用范围较小时,主要出现在矿柱的顶部或底部。为了保证矿柱的稳定性,建议保留矿柱为双曲面型。

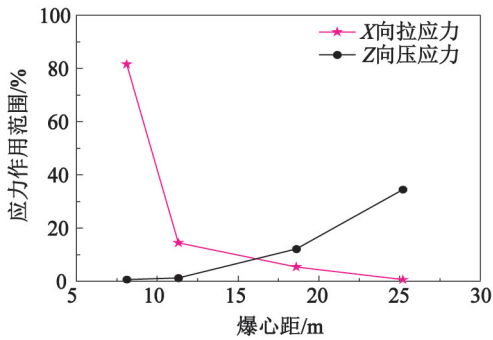


图 11 应力作用范围
Fig. 11 Action ranges of stress

3.7 多因素联合分析

爆破作用下,不同位置矿柱的应力峰值和作用范围的多因素联合分析如图 12 所示。

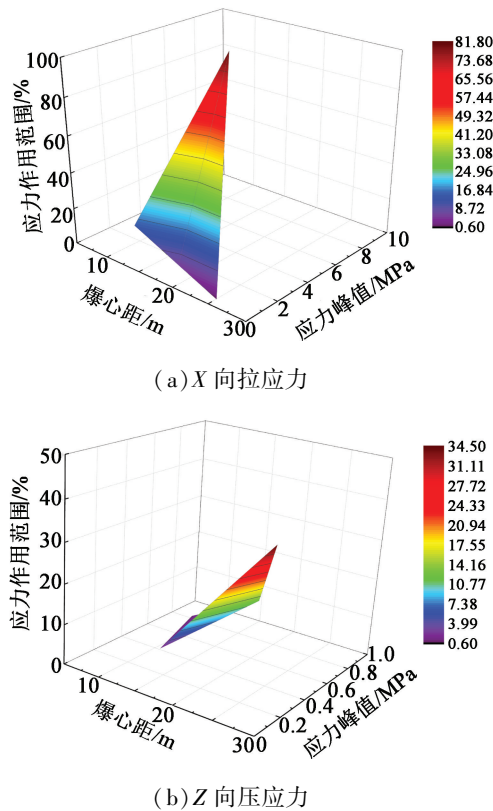


图 12 多因素联合分析

Fig. 12 Multi-factor combined analysis

从图 12 可知:矿柱 X 向拉应力曲面近似为三角形,且沿对角分布,当矿柱距离爆源较近时,矿柱受空气冲击波和拉应力的叠加作用,建议对矿柱进行

防护;矿柱 Z 向压应力曲面分布集中,但远端矿柱作用范围增加,应防止矿柱在累积振动作用下产生损伤效应。

4 结论

- 1) 地下矿山采用平行排列布孔进行资源开采时,矿柱受水平方向的爆破振动作用强烈,且质点振速峰值时刻均出现在首段别炮孔爆破之后,说明炮孔爆破时,临空面增加,会减弱爆破振动对矿柱的影响。
- 2) 矿柱的拉应力峰值和作用范围随爆心距的增加呈非线性衰减趋势,但当矿柱与爆源的距离小于 10 m 时,矿柱受空气冲击波和拉应力的叠加作用,导致矿柱发生破坏,建议对近端矿柱增加防护。
- 3) 当矿柱与爆源的距离减小时, Z 向压应力峰值呈波浪型变化,作用范围递减,且主要出现在矿柱的顶部或底部。为了避免矿柱产生累积损伤效应,建议保留矿柱为双曲面型。

参 考 文 献

[1] 尹升华, 吴爱祥. 缓倾斜中厚矿体采矿方法现状及发展趋势[J]. 金属矿山, 2007(12): 10-13.
YIN S H, WU A X. Status quo of mining methods for gently inclined medium-thick orebodies and their development trend [J]. Metal Mine, 2007(12): 10-13.

[2] 曹树刚. 现代采矿理论及技术研究进展[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2020.

[3] 高文乐, 李坤鹏, 段耀奎, 等. 埋地输油管道对爆破振动的动力响应[J]. 爆破器材, 2021, 50(1): 53-58.
GAO W L, LI K P, DUAN Y K, et al. Dynamic response of buried oil pipeline to blasting vibration [J]. Explosive Materials, 2021, 50(1): 53-58.

[4] LI N, ZARE M, YI C K, et al. Stability risk assessment of underground rock pillars using logistic model trees [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(4): 2136.

[5] 田园, 董英健. 地下巷道在爆破振动作用下的动态响应特征研究[J]. 爆破器材, 2019, 48(6): 60-64.
TIAN Y, DONG Y J. Dynamic response characteristics of underground roadway under blasting vibration [J]. Explosive Materials, 2019, 48(6): 60-64.

[6] 刘洪强, 张钦礼, 潘常甲, 等. 空场法矿柱破坏规律及稳定性分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2011, 28(1): 138-143.

LIU H Q, ZHANG Q L, PAN C J, et al. Analysis of the failure law and stability of the pillar in open stope mining [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2011, 28 (1): 138-143.

[7] 李夕兵, 李地元, 郭雷, 等. 动力扰动下深部高应力矿柱力学响应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26 (5): 922-928.

LI X B, LI D Y, GUO L, et al. Study on mechanical response of highly-stressed pillars in deep mining under dynamic disturbance [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 922-928.

[8] 李小双, 李耀基, 王孟来, 等. 缓倾斜中厚磷矿床矿柱稳定性及采场结构优化[J]. 金属矿山, 2015(5): 44-47.

LI X S, LI Y J, WANG M L, et al. Stability of the pillar and stope structure of optimization of gently inclined and medium thick phosphate rock [J]. Metal Mine, 2015 (5): 44-47.

[9] 于清军, 李元辉, 刘照朋, 等. 落矿冲击作用下矿柱结构参数优化与稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(5): 1181-1191.

YU Q J, LI Y H, LIU Z P, et al. Stability analysis and structural parameter optimization of pillar under impact of rockfall [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(5): 1181-1191.

[10] JIANG L C, SHEN B B, XUE L L. Determining the critical blasting load of cracked strip bauxite pillars [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80: 4639-4650.

[11] 熊晓勃, 程海勇, 吴顺川, 等. 分区协同开采下矿柱力学响应与稳定性分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2021, 17(8): 77-83.

XIONG X B, CHENG H Y, WU S C, et al. Analysis on mechanical response and stability of mine pillar under subarea synergetic mining [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2021, 17(8): 77-83.

[12] GUO W H, CAO A Y, XUE C C, et al. Mechanism and evolution control of wide coal pillar bursts in multithick key strata [J]. Shock and Vibration, 2021, 28 (5): 4696619.

[13] 王如坤, 梅甫定. 高应力矿柱在动力扰动下力学响应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 349-355, 419.

WANG R K, MEI F D. Study on mechanical response of highly-stressed pillars under dynamic disturbance [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2): 349-355, 419.

[14] 王振达. 房柱采矿法矿柱在爆破荷载作用下动力响应研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2018.

WANG Z D. Study on dynamic response of pillar under blasting load using room and pillar mining method [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2018.

[15] 中国电力企业联合会. 工程岩体试验方法标准: GB/T 50266—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

China Electricity Council. Standard for test methods of engineering rock mass: GB/T 50266—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.

[16] 胡刚, 费鸿禄, 包士杰, 等. 爆破荷载作用下隧道初次衬砌结构的动力响应 [J]. 公路交通科技, 2019, 36(10): 83-90.

HU G, FEI H L, BAO S J, et al. Dynamic response of tunnel primary lining structure under blasting load [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2019, 36(10): 83-90.

版 权 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部