

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.013

## 地下巷道对近区爆破动荷载的响应特性研究\*

阎要锋<sup>1</sup>,王公忠<sup>2</sup>,严敏嘉<sup>1,3</sup>,柴修伟<sup>4</sup>,徐亮<sup>5</sup>,彭亚利<sup>5</sup>,金胜利<sup>5</sup>

(1. 武汉理工大学 土木与建筑工程学院, 武汉 430070; 2. 河南工程学院 安全工程学院, 郑州 450000;  
3. 广西民族大学 建筑工程学院, 南宁 530006; 4. 武汉工程大学 资源与安全工程学院, 武汉 430073;  
5. 湖北兴发化工集团有限责任公司, 兴山 443700)

**摘要:** 在地下矿产资源开采和地下空间群及隧道开挖过程中, 钻爆施工具有无法取代的优势, 然而地下既有开挖空间受近区开挖爆破动荷载的影响也不容忽视。为提高钻爆开挖后地下空间围岩安全、稳定以及优化开挖爆破方案, 结合某磷矿采掘巷道特征, 采用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 建模计算既有巷道在不同距离爆源(爆源距离巷道距离分别为 10 m、14 m、18 m、22 m)巷道的顶板、底板、巷帮动力响应分布。计算结果表明: 既有巷道断面近区岩石的破坏以拉应力破坏为主, 压应力起辅助破坏作用; 相邻巷道的合理布置范围在 14~18 m 范围之内, 有效保证采场结构的安全稳定; 倒梯形断面有助于爆炸应力波的引导和发散, 同时也有助于提高既有巷道的安全稳定。

**关键词:** 磷矿; 动荷载; 近区爆破; 倒梯形断面; 采掘巷道

**中图分类号:** TD235.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)03-0075-07

## Study on Response Characteristics of Underground Roadway on Adjacent Blasting Dynamic Load

YAN Yao-feng<sup>1</sup>, WANG Gong-zhong<sup>2</sup>, YAN Min-jia<sup>1,3</sup>,  
CHAI Xiu-wei<sup>4</sup>, XU Liang<sup>5</sup>, PENG Ya-li<sup>5</sup>, JIN Sheng-li<sup>5</sup>

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Safety Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 450000, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Guangxi University for Nationalities, Nanning 530006, China; 4. School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430073, China; 5. Hubei Xingfa Chemicals Group Co Ltd, Xingshan 443700, China)

**Abstract:** In the process of underground mineral resources exploitation, underground space group and tunnel excavation, drilling and blasting construction has irreplaceable advantages. However, the influence of dynamic load of adjacent excavation blasting on the existing underground space cannot be ignored. In order to improve the safety and stability of surrounding rock mass of the underground space after drilling and blasting and optimize the excavation and blasting scheme, combined with the characteristics of a phosphate mining roadway, the finite element software ANSYS/LS-DYNA was used to model and calculate the dynamic response distribution on the roof, floor and roadway side of the existing roadway at different distances from the explosive source (the distance from the explosive source to the roadway was 10 m, 14 m, 18 m and 22 m, respectively). The calculation results show that the failure of rock near the existing roadway section was mainly caused by tensile stress, and the compressive stress played an auxiliary role. The reasonable layout range of adjacent roadway was within the range of 14~18 m to effectively ensure the safety and stability of the stope structure. The inverted trapezoidal section was helpful to guide and diverge the explosion

stress wave and improve the safety and stability of the existing roadway.

**Key words:** phosphate ore; dynamic load; near-zone blasting; inverted trapezoidal section; mining roadway

随着世界经济的高速发展,深部矿产资源开采、交通隧道、深埋存储、深地军事等工程将向深部岩体开挖转变,“高地应力”是深部岩石力学的重要研究方面,如锦屏二级水电站引水隧洞最大地应力可达到 72 MPa;锦屏一级和官地等水电工程地下洞室的最大主应力也达到 20~40 MPa。目前开挖施工中钻爆法依然是深部工程开挖最常用的方式,相比于浅层岩体开挖,在“三高一扰动”的影响下,深部岩体钻爆开挖会呈现出更多的工程技术难题。国内外许多学者对深部岩体工程进行了大量的研究探索,岳万友<sup>[1]</sup>、蔡济勇等采用有限元模拟方法研究深部裂隙岩体在爆破动荷载作用下的力学特性<sup>[2]</sup>;宋凯文等从理论上分析和数值模拟角度讨论了开挖过程中岩体内应力波传播规律以及加卸载应力波之间作用特征<sup>[3,4]</sup>,以及在显式分析里面地应力施加和初始地应力对掏槽爆破有明显的抑制作用<sup>[5,6]</sup>。Mandal 和 Singh 发现在钻爆开挖过程中<sup>[7]</sup>,初始地应力的瞬态卸荷会大幅度增加隧洞的超挖量。严鹏等采用 ANSYS 的动力计算模块研究了巷道围岩的动态卸荷过程<sup>[8]</sup>,并将数值解与理论解进行了对比验证。卢文波等基于等效弹性边界概念<sup>[9]</sup>,提出了一种群孔起爆条件下爆炸荷载与开挖荷载瞬态卸荷耦合作用的等效数值模拟方法。

对于深部开挖卸荷下围岩力学特征,董春亮等认为主要表现为最小主应力卸荷、最大主应力集中<sup>[10]</sup>,而主应力差的瞬间增大,诱发开挖面内裂隙扩展、贯通,形成由强及弱连续分布的破坏区。Carter 等针对长隧道的开挖研究发现<sup>[11]</sup>,初始地应力的瞬态卸载会产生强烈的拉应力,其幅值与卸荷

速率有关。同时深部岩体往往存在高地应力,Toks 和 Kehrer 认为高地应力诱导引起应变能快速释放诱发的地表振动甚至超过爆炸地震波引起的地表振动<sup>[12]</sup>。Cao 等研究不同地应力状态下地应力瞬态卸荷诱发围岩振动的特性<sup>[13]</sup>。Yang 等采用幅值谱分析和时频分析方法对地应力瞬态卸荷诱发的围岩振动进行了识别<sup>[14]</sup>。卢文波等认为深埋高地应力岩体爆破开挖,伴随着爆破破岩裂纹扩展以及新开挖面的形成<sup>[15]</sup>,开挖面上的地应力在爆破瞬间也随之释放。

国内外学者对深部岩体开挖过程进行了全面系统的研究,而对于逐步向深部开拓采掘的矿山,对于相邻开拓采掘巷道的爆破开挖施工的受力特征和变形破坏情况研究较少。因此通过构建数值计算模型,研究临近巷道爆破施工对于既有倒梯形隧道的影 响,合理确定其安全距离有助于地下工程结构安全稳定,同时指导优化钻爆施工技术参数。

## 1 矿山地质背景及计算模型

### 1.1 地质背景

某磷矿地质构造复杂,矿层呈缓倾斜产出,为薄-中厚层,矿体形态基本呈层状分布且两矿层相距较近,形成缓倾斜叠层矿体。矿层顶板为中厚层状夹薄层状结构,其中夹有相对软弱薄层状云质泥岩。断面形状采用倒梯形布置,断面顶板宽为 4.2 m,底板宽为 4.0 m,边墙高为 4.0 m,断面面积为 16.4 m<sup>2</sup>,矿石坚固性系数  $f=10$ ,巷道开挖断面特征如图 1 所示。



图 1 某巷道轮廓

Fig. 1 The outline of a roadway

收稿日期:2021-06-28

作者简介:阎要锋(1989-),男,河南省洛阳市人,博士,主要研究方向为隧道及地下工程,(E-mail)wind187360@whut.edu.cn。

通讯作者:柴修伟(1980-),男,安徽亳州人,博士,主要研究方向为爆破破岩理论与技术、岩土工程与安全监测技术研究,(E-mail)xwchai@wit.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(51709257);湖北省安全生产专项资金项目(鄂应急办[2020]12号);广西民族大学科研基金资助项目(引进人才科研启动项目 2020KJQD26)

### 1.2 计算模型

本数值模型采用 ANSYS/LSDYNA 显式算法,为节省计算机时和提升计算效率,对该模型进行相应简化如下:(1)将三维模型抽象为平面应变模型来模拟在距离既有运输巷道不同距离处采准巷道爆

破施工对既有运输巷道的影响。模型的尺寸为: $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  分别为 5000 cm、2400 cm、6 cm;(2) 考虑到建立群孔炸药的复杂性以及两个巷道距离相对较远,为便于数值计算,用集中装药取代施工现场的群孔装药;(3) 在模型边界施加无反射边界条件实现以有限的模型模拟无限域;(4) 针对不同工况下特征单元精确位置选取问题,考虑模型尺寸较大且相邻巷道距离较远特点,将岩石区域中的炸药位置不进行开挖设置炸药而是另行建立炸药单元附着在岩石上。模型材料采用 2 号岩石乳化炸药参数如表 1 所

示,磷矿石的力学参数如表 2 所示,爆破数值模型如图 2(a)所示,从图 2(b)中单元时程压力曲线的特点可以看出,模型的简化处理是合理的。

表 1 炸药参数

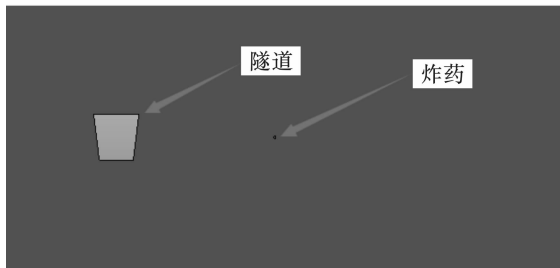
**Table 1 Explosive parameters**

| 密度 $\rho/$<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 爆速 $D/$<br>( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 压力 $P_{\text{cl}}/$<br>MPa | 体积模量<br>$K/\text{MPa}$ | 剪切模量<br>$G/\text{MPa}$ |
|---|---|----------------------------|------------------------|------------------------|
| 1.05  | 3500  | 3.24E+03                   | 0                      | 0                      |

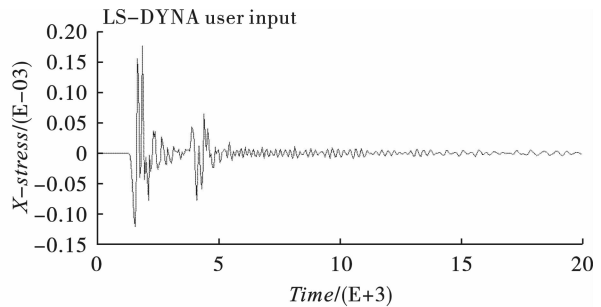
表 2 岩石力学参数

Table 2 Rock mechanical parameters

| 密度 $\rho/$<br>( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ) | 弹性模量<br>$E/\text{MPa}$ | 泊松比/ $\mu$ | 体积模量<br>$K/\text{MPa}$ | 抗压强<br>$\sigma_c/\text{MPa}$ | 抗拉强度<br>$\sigma_t/\text{MPa}$ |
|---|------------------------|------------|------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 2.73  | 4.0E+04                | 0.3        | 60.0                   | 40.0                         | 15                            |



(a) 数值模型概况  
(a) Overview of numerical models



(b) 模型单元爆炸应力曲线  
(b) Model element explosion stress curve

图 2 模型概况及单元应力曲线图

Fig. 2 Model overview and element stress curve

## 2 爆破数值计算模型结果分析

地下矿山、交通隧道、水利工程等在施工过程中,同一水平或者不同水平相邻巷道在不同时间甚至同一时间进行钻爆开挖施工时有发生,高能量的爆破荷载的输入严重威胁到巷道结构物的安全稳定,巷道结构物在施工过程中及其后续运行过程中安全性成为亟待研究和解决的问题,因此以某个矿区某开采水平施工现场为背景进行针对性分析来阐明不同相对水平位置处巷道爆破施工对既有运输巷道的影响。

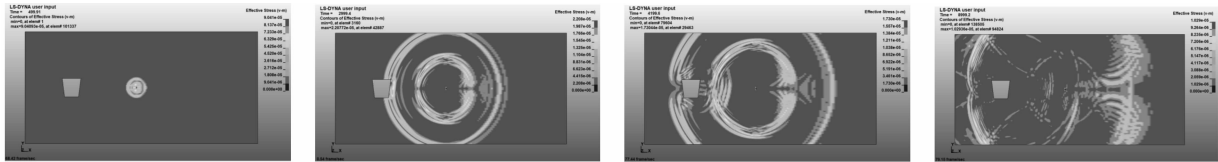
### 2.1 爆源在巷道右侧不同位置典型时刻应力云图分析

如图 3 所示,不同时刻下爆源位置在既有运输巷道右侧不同相对位置处的有效应力云图(依次记录 500  $\mu\text{s}$ 、3000  $\mu\text{s}$ 、4200  $\mu\text{s}$ 、9000  $\mu\text{s}$  处的四个典型时刻),根据在应力波对岩石的做功过程中,根据炸

药对岩石做功的理论和原理,岩石在炸药附近最先出现环向裂纹,然后出现径向裂纹,裂纹交叉贯通实现了岩石破碎,在爆生气体巨大的准静态气体压力作用下实现碎石的抛掷飞溅。图 3 中的 4 个模型显示爆源位置距离既有运输巷道依次是 10 m、14 m、18 m、22 m,四个计算模型的有效应力云图形态的变化过程大致经历以下三个阶段:第一阶段在均质各向同性的物理环境下应力波呈现以炸药为中心以柱面波的形式向四周传播特点,其具体形态见 500  $\mu\text{s}$  时刻应力云图且随着时间继续应力范围不断增大。第二阶段:随着应力波继续传播,呈显现出如图 3(a)中第 2 幅图片所示的应力集中现象,当应力波在行进中遇到结构物,应力云图产生剧烈的“结构效应”,见图 3(a)第 3 幅图,应力在巷道右侧壁及其上隅角出现剧烈的应力集中,同时应力波在巷道侧壁处产生强烈的反射,行进的应力波和反射的应力波在削弱应力的同时改变应力波的面前进方向。

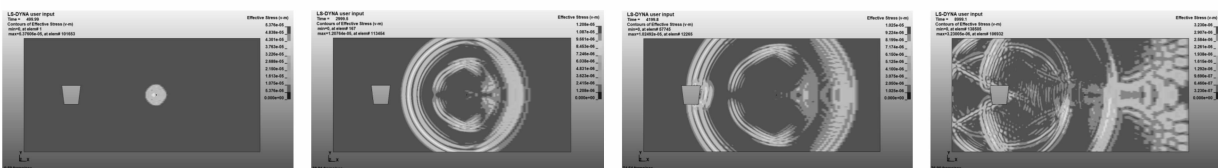
第三阶段:当应力波波阵面通过巷道结构后,应力波的形态发生显著变化,波阵面由最初凸形状变为凹形状且在最凹处应力强度最低,在巷道左侧壁处显示为应力降低区,仅在巷道左侧上下隅角出现微弱的应力集中,随着爆源和既有运输巷道距离加大,到达既有运输巷道轮廓周围的应力波成分变得异常复

杂,如图3(a)的第2、3幅图所示,出现这样情况这可能与巷道结构形状、应力波的叠加相关也可能与应力波传播一定距离后因强度衰减频率分散有关,限于篇幅,仅对爆源位置在巷道右侧10 m进行具体研究和讨论,后续的14 m、18 m、22 m的工况产生的有效应力波云图均出现上述特征,这里不再赘述。



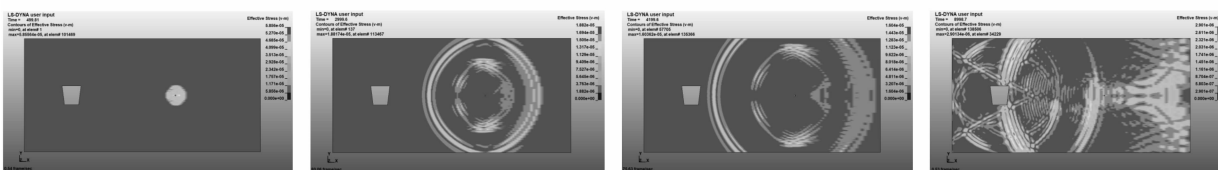
(a) 爆源位置在巷道右侧10 m

(a) The detonation source is located at the right side of ten miles of the roadway



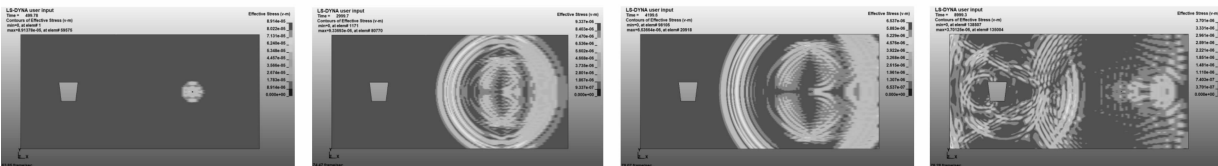
(b) 爆源位置在巷道右侧14 m

(b) The detonation source is located at the right side of fourteen miles of the roadway



(c) 爆源位置在巷道右侧18 m

(c) The detonation source is located at the right side of eighteen miles of the roadway



(d) 爆源位置在巷道右侧22 m

(d) The detonation source is located at the right side of twenty-two miles of the roadway

图3 爆源位置在既有运输巷道右侧典型时刻应力云图

Fig. 3 Stress nephogram of typical moments at the right side of the existing transportation roadway where the detonation source is located

## 2.2 爆源位置在巷道右侧不同位置处典型时刻单元应力分析

在2.1节中采取定性的分析方法通过用应力云图分析来衡量和评价距离不同距离处的临近巷道爆破产生的应力波对既有运输巷道结构安全和稳定性的分析,为了能够从不同方位和不同损伤破坏深度研究临近巷道爆破对既有运输巷道的影响,从单元拉、压应力曲线角度对模型在顶板、底板、巷道帮部三个特殊部位选取特征单元进行研究,图4所示的A、B、C、D表示临近巷道距离既有运输巷道依次是10 m、14 m、18 m、22 m,图中横轴为单元编号简写形式。

图4显示巷帮附近距离洞壁一定距离处选取的13个特征单元的应力状态,每个单元的尺寸为6 cm,由表2参数可知岩石单元的应力状态均小于岩石的抗压强度,且爆源距离洞壁距越远其压应力越小,并且都在距离洞壁附近处其压力值变化幅度较大,在极小范围内单元由最小压应力变化为最大压应力,其最大压应力低于岩石的抗压强度;特征单元拉应力曲线亦在距离隧道洞壁42 cm处变化明显,尤其爆源在距离既有运输巷道10 m、14 m处拉应力变化最为明显,且拉应力数值较大超过岩石的抗拉强度。由上可知,在巷道巷帮附近处岩石的破

坏以拉应力破坏为主,同时相邻巷道爆破施工巷帮

的安全范围为14~18 m。

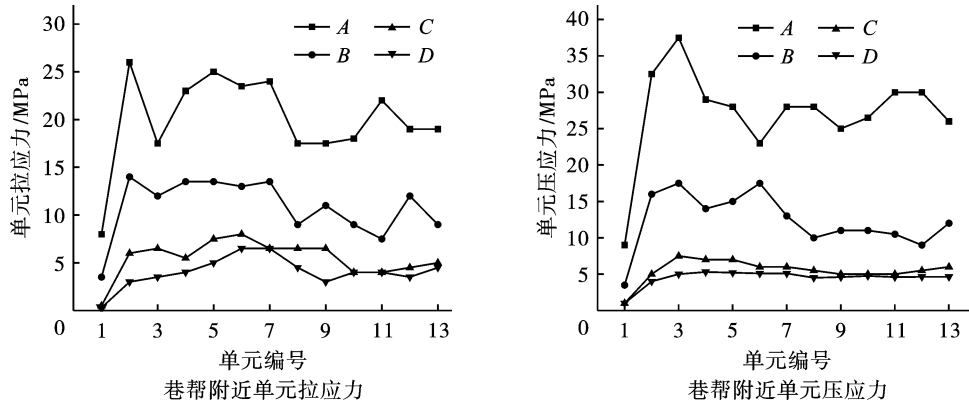


图4 运输巷道巷帮附近单元应力

Fig. 4 Unit stress near roadway side of transportation roadway

图(5)表明,巷道底板附近特征单元应力变化特征,对于单元压应力:随着爆源距离的增加,爆源在距离既有运输巷道10~18 m阶段对应单元的应力衰减梯度较为明显,爆源在距离既有运输巷道18~22 m阶段单元应力衰减幅度降低。各个模型中距离巷道轮廓越远压应力数值越小,这反映出与一般模型规律一致的特点,同时由图5和表2可知单元的压应力远远小于岩石的抗压强度不能引起岩石的直接破坏。对于单元拉应力:其变化特征基本

遵循拉应力的变化规律,但爆源在距离既有运输巷道10~14 m阶段时,单元拉应力变化幅度较大,这可能与爆炸应力波作用特点有关,也与巷道结构特点有关,最大拉应力超过岩石的抗拉强度,爆源在距离既有运输巷道18~22 m阶段单元拉应力变化较为平缓,且拉应力数值较小,其数量级不足以造成岩石的破坏。因此,对于相邻巷道爆破施工的巷道底板来说巷道变形破坏仍然是以拉应力为主。

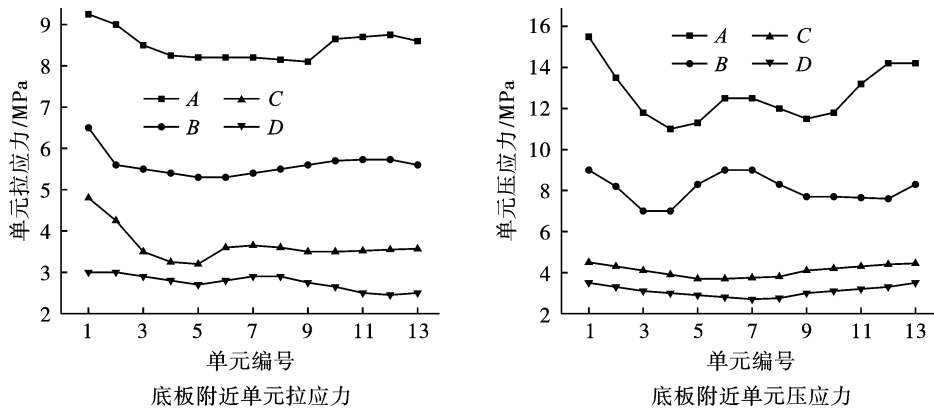


图5 运输巷道底板附近单元应力

Fig. 5 Unit stress near the floor of transport roadway

图(6)显示巷道顶板附近的单元应力特征,单元编号从1到13表示特征单元距离隧道轮廓面越来越近,对于单元压应力:在爆源距离既有运输巷道为10 m时,无论压应力还是拉应力特征单元曲线均出现震荡的特点,这与应力波的作用特点以及和巷道开挖后巷道结构特点有关;同样是在爆源距离既有运输巷道为18、22 m时,特征单元的应力曲线变化趋于平稳,巷道周边的岩体仍是以拉应力破坏为主,且既有运输巷道和临近巷道的安全范围在14~

18 m 之间。

### 3 结论

基于实际工程案例并结合显示分析有限元软件对距离既有运输巷道不同距离处的爆源进行了相关分析,得出如下结论:

- (1)通过对特征单元进行分析发现,巷道断面近区岩石的破坏主要以拉应力破坏为主,压应力仅起辅助破坏作用。

(2)通过对顶板、底板、巷道侧壁选取特征单元研究,结果表明相邻巷道的合理布置范围在14~18 m范围之内。

(3)通过分析相邻巷道爆破开挖爆炸应力波对

既有运输巷道应力云图,发现倒梯形断面对于爆炸应力波有极强的引导和发散作用,有效抑制爆炸应力波对巷道的破坏,有利于维护巷道的安全稳定。

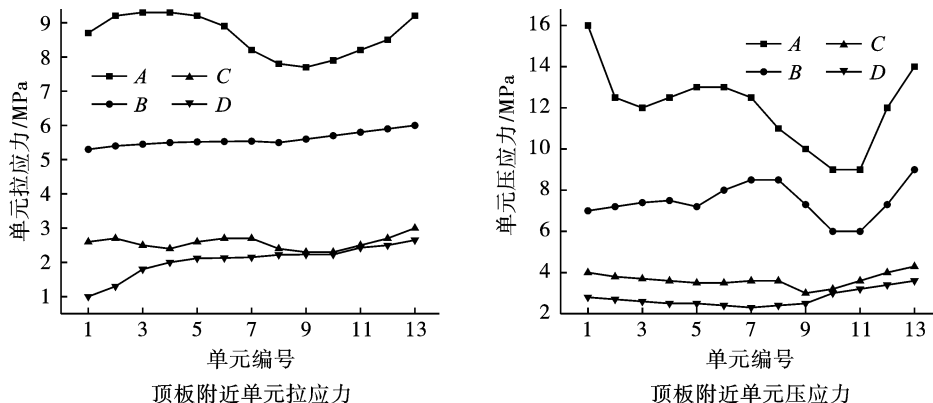


图6 运输巷道顶板附近单元应力

Fig. 6 Unit stress near the roof of transport roadway

### 参考文献 (References)

- [1] 岳万友,李建国,柴修伟,等.地应力对含裂隙岩体爆破影响分析研究[J].爆破,2021,38(1):51-57.
- [1] YUE W Y, LI J G, CHAI X W, et al. Analysis and research on influence of ground stress on blasting of rock with fracture[J]. Blasting, 2021, 38(1): 51-57. (in Chinese)
- [2] 蔡济勇,杨建华,姚池,等.深埋隧洞钻爆开挖瞬态卸荷诱发围岩振动特性研究[J].爆破,2019,36(2):19-25.
- [2] CAI J Y, YANG J H, YAO Chi, et al. Study on vibration characteristics of surrounding rock induced by transient unloading during drilling and blasting of deep tunnel[J]. Blasting, 2019, 36(2): 19-25. (in Chinese)
- [3] 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.
- [3] LI X P, SONG K W, LUO Y, et al. Study on the influence law of high ground stress on cut blasting and blasting stress wave[J]. Blasting, 2019, 36(2): 13-18, 53. (in Chinese)
- [4] 宋凯文.加卸载应力波对深部地下洞室变形和破坏影响规律的研究[D].武汉:武汉理工大学,2018.
- [4] SONG K W. Study on the influence law of stress waves on deformation and failure of deep underground cavity[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [5] 王礼立.应力波基础[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [6] 时党勇,李裕春,张胜民.基于ANSYS/LS-DYNA 8.1进行显式动力分析[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [7] MANDAL S K. Evaluating extent and causes of over break in tunnels[J]. Tunneling & Underground Space Technology, 2009, 1(24): 22-36.
- [8] 严鹏,卢文波,许红涛.高地应力条件下隧洞开挖动态卸荷的破坏机理初探[J].爆炸与冲击,2007,27(3):283-288.
- [8] YAN P, LU W B, XU H T. A preliminary study on failure mechanism of dynamic unloading of tunnel excavation under high in-situ stress[J]. Explosion and Shock, 2007, 27(3): 283-288. (in Chinese)
- [9] 卢文波,杨建华,陈明,等.深埋隧洞岩体开挖瞬态卸荷机制及等效数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2011,30(6):1089-1096.
- [9] LU W B, YANG J H, CHEN M, et al. Transient unloading mechanism and equivalent numerical simulation of rock mass excavation in deep tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1089-1096. (in Chinese)
- [10] 董春亮,赵光明,李英明,等.深部圆形巷道开挖卸荷的围岩力学特征及破坏机理[J].采矿与安全工程学报,2017,34(3):511-518,526.
- [10] DONG C L, ZHAO G M, LI Y M, et al. Mechanical characteristics and failure mechanism of surrounding rock during excavation and unloading of deep round roadway[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(3): 511-518, 526. (in Chinese)
- [11] CARTER J P. Sudden excavation of a long circular tunnel in elastic ground[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Ab-

- stracts,1990,27(2):129-132.
- [12] TOKS Z M N,KEHRER H H. Tectonic strain release by underground nuclear explosions and its effect on seismic discrimination [J]. *Geophysical Journal International*, 1972,31(1-3):141-161.
- [13] CAO W Z,LI X B,TAO M, et al. Vibrations induced by high initial stress release during underground excavations [J]. *Tunneling and Underground Space Technology*, 2016,53:78-95.
- [14] YANG J H,LU W B,JIANG Q H, et al. A study on the vibration frequency of blasting excavation in highly stressed rock masses[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*,2016,49:2825-2843.
- [15] 卢文波,杨建华,陈明,等. 深埋隧洞岩体开挖瞬态卸荷机制及等效数值模拟[J]. *岩石力学与工程学报*,2011,30(6):1089-1096.
- [15] LU W B,YANG J H,CHEN M, et al. Transient unloading mechanism and equivalent numerical simulation of rock mass excavation in deep tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2011,30(6):1089-1096. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第30页)

- [5] 蒋瑞岗. 战术导弹级间线分离探讨[J]. *航天返回与遥感*,2001,29(3):31-33.
- [5] JIANG R G. Discussion on the separation of tactical missile stages [J]. *Aerospace Return and Remote Sensing*, 2001,29(3):31-33. (in Chinese)
- [6] 武新峰,刘观日,雷勇军,等. 基于 LS-DYNA 的包带式星箭连接装置分离过程和冲击响应分析[J]. *振动与冲击*,2013,32(24):174-179.
- [6] WU X F,LIU G R,LEI Y J, et al. LS-DYNA-based separation process and shock response analysis of the belt-type star-and-arrow connecting device [J]. *Vibration and Shock*,2013,32(24):174-179. (in Chinese)
- [7] TAKEUCHI S,ONODA J. Estimation of separation shock of the marman clamp system by using a simple band-mass model[J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*,2002,45(147):53-60.
- [8] 赵波,詹发民,王涛. 磁性爆破切割装置研究[J]. *四川兵工学报*,2015,36(2):18-20.
- [8] ZHAO B,ZHAN F M,WANG T. Research on magnetic blasting cutting device[J]. *Sichuan Armory Engineering Journal*,2015,36(2):18-20. (in Chinese)
- [9] KADHOM B. Blast performance of reinforced concrete columns protected by FRP laminates [D]. University of Ottawa,2016.
- [10] REN Ming-fa,WENG Fei,SUN Jing, et al. Influence of weakening groove on cutting results of composites subjected to shaped charge jet [J]. *Shock and Vibration*, 2021,doi.org/10.1155/2021/5528574.
- [11] 胡坤伦,汪齐,王猛,等. 爆炸分离钛合金板的研究[J]. *振动与冲击*,2019,38(13):21-25.
- [11] HU K L,WANG Q,WANG M, et al. Research on explosive separation of titanium alloy plates[J]. *Vibration and Shock*,2019,38(13):21-25. (in Chinese)
- [12] 左惟炜,肖来元,廖道训. Tsai-Wu 准则用于三维编织复合材料矩形梁强度计算[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*,2006(12):74-76.
- [12] ZUO W W,XIAO L Y,LIAO D X. The Tsai-Wu criterion is used to calculate the strength of three-dimensional braided composite rectangular beams [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition)*, 2006(12):74-76. (in Chinese)
- [13] 胡坤伦,王志富,王猛,等. 薄层碳纤维环氧树脂复合材料爆炸分离的探究[J]. *火工品*,2019(4):6-9.
- [13] HU K L,WANG Z F,WANG M, et al. Explosive separation of thin-layer carbon fiber epoxy resin composite materials[J]. *Initiating Explosives*,2019(4):6-9. (in Chinese)
- [14] 门建兵,蒋建伟,王树有. 爆炸冲击数值模拟技术基础[M]. 北京:北京理工大学出版社,2015:173-174.
- [14] MENJ B,JIANG J E,WANG S Y. Fundamentals of explosion impact numerical simulation [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2015: 173-174. (in Chinese)
- [15] 徐维铮,吴卫国. JWL 状态方程及其等效多方状态方程在内爆炸计算中的应用分析[J]. *中国舰船研究*, 2019,14(3):83-91.
- [15] XU W Z,WU W G. Application analysis of JWL equation of state and its equivalent multilateral equation of state in internal explosion calculation [J]. *China Ship Research*,2019,14(3):83-91. (in Chinese)
- [16] 王作山,刘玉存,张景林,等. 约束条件及装药直径对 HMX/F2641 传爆药爆压影响的实验研究[J]. *爆炸与冲击*,2003,23(3):248-252.
- [16] WANG Z S,LIU Y C,ZHANG J L, et al. Experimental study on the influence of constraint conditions and charge diameter on explosive pressure of HMX/F2641 Booster[J]. *Explosion and Shock*, 2003, 23(3): 248-252. (in Chinese)

英文编辑:陈东方