

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.06.012

# 地下巷道在爆破振动作用下的动态响应特征研究\*

田园<sup>①</sup> 董英健<sup>②</sup>

①重庆市轨道交通(集团)有限公司(重庆,401120)

②辽宁科技大学矿业工程学院(辽宁鞍山,114051)

[摘要] 为了研究地下巷道在爆破振动作用下的响应特征,以某露天铁矿转地下爆破开挖为研究背景,在地下巷道确定监测位置,结合爆破振动理论建立爆破振动衰减数学模型。为弥补试验方案不足,利用FLAC 3D软件建立地下巷道概念模型,分析地下巷道在爆破振动作用下的速度、位移的变化特征,并与现场试验进行对比。结果表明:当爆心距小于50 m时,水平径向峰值振动速度衰减变化率达到53.63%,而水平切向、竖直方向峰值振动速度衰减变化率分别达到53.07%和47.02%。通过对爆破时地下巷道的数值模拟分析可知,爆破振动速度变化主要集中在巷道的顶板及底板,而巷道竖直位移呈现先逐渐变大、后趋于平稳的状态,处于巷道安全允许范围之内。

[关键词] 露天矿;爆破振动;地下巷道;动态分析

[分类号] TU93

## Dynamic Response Characteristics of Underground Roadway under Blasting Vibration

TIAN Yuan<sup>①</sup>, DONG Yingjian<sup>②</sup>

①Chongqing Rail Transit (Group) Co., Ltd. (Chongqing, 401120)

②School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning (Liaoning Anshan, 114051)

[ABSTRACT] In order to study the response characteristics of underground roadway under blasting vibration, a mathematical model of blasting vibration attenuation was established based on the theory of blasting vibration and the monitoring position of underground roadway in an open pit mine under the background of underground blasting excavation. In order to make up for the deficiency of the test scheme, a conceptual model of underground roadway was established by FLAC 3D software. Variation characteristics of velocity and displacement of underground roadway under blasting vibration were analyzed, and they were compared with those obtained from the field test. The results show that when the distance between detonation centers is less than 50 m, the attenuation rate of peak horizontal and radial vibration velocities reaches 53.63%, while the attenuation rate of peak horizontal and vertical vibration velocities reaches 53.07% and 47.02%. Through the numerical simulation analysis of underground roadway, the change of blasting vibration speed mainly concentrates on the roof and floor of the roadway, while the vertical displacement of the roadway shows a state of gradual increase and then becoming stable, which is within the safe allowable range of the roadway.

[KEYWORDS] open-pit mine; blasting vibration; underground roadway; dynamic analysis

## 引言

露天矿在开采过程中,尤其在开挖台阶时主要采取爆破破岩技术手段<sup>[1]</sup>。在爆破施工期间,炸药在具有临空面的介质中爆炸时会产生爆破地震波,

而爆破地震波是以椭球状态向四周传播,引起周围环境的振动,一旦超出周围建(构)筑物的安全允许范围,将导致其严重损害<sup>[2-4]</sup>。在炸药爆炸的瞬间,无法抑制爆破地震波的产生,但可以采取相关手段与方法降低其爆破振动效应。郑儒彬<sup>[5]</sup>以爆区邻近的水利枢纽为工程背景,运用修正后的爆破振动

\* 收稿日期:2019-04-12

基金项目:“十三五”国家重点研发计划,多层大空区安全处理与生产协同技术(2016YFC0801603);辽宁科技大学校研究生科技创新项目,高寒地区矿山爆破振动对边坡响应特征研究(LKDYC201819)

第一作者:田园(1989-),女,工程师,从事轨道交通安全技术和管理工。E-mail:965372106@qq.com

预测模型,提出了爆破振动速度传播规律,为控制爆破振动危害效应提供了参考。石连松等<sup>[6]</sup>对浅埋隧道的爆破振动展开了多次的监测试验,结合监测的数据,提出了隧道存在空洞效应现象,降低了掏槽孔爆破的振动危害效应。王玉乐等<sup>[7]</sup>利用数值模拟手段,建立了爆破对填充体的动态响应模型,总结了爆破地震波的传播规律。

目前,研究和评价爆破振动的危害效应主要从质点的峰值振动速度角度出发,建立爆破振动速度传播规律的数学模型。本文中,将爆破振动监测方案以及数值模拟分析手段结合起来,综合评价爆破振动对地下巷道的危害效应,为爆破时地下巷道的安全稳定性做出真实性评估。

## 1 工程背景

某铁矿是鞍钢矿业露天矿主要产区之一,由于长期开采,已不满足露天开采的要求,展开了露天转地下的开采设计。为掌握地下巷道爆破振动速度的衰减规律以及稳定性,对何家采区+248 m平台进行爆破振动监测。其中,爆区布置29个炮孔,炸药类型为铵油、乳化炸药,孔距、排距均为7 m×6 m,孔深12~13 m。采用径向不耦合装药结构以及逐孔微差起爆方式。考虑到台阶爆破振动对边坡的危害效应,依照《爆破振动安全规程》的有关规定,对+248 m台阶爆破作业进行振动监测,采集爆破振动数据,为爆破现场提供科学的理论依据,有利于对地下巷道危害效应的准确预测及控制。

## 2 爆破振动的监测

### 2.1 振动监测原理

炸药爆炸时会产生大量的高温、高压气体,该气体迅速膨胀扩散,并作用于炮孔壁上,在炮孔周围形成冲击波和压力场。由于周围岩石介质消耗了大部分能量,导致冲击波逐渐衰减至爆破地震波。对爆区周围环境来说,爆破地震波才是造成建(构)筑物失稳乃至破坏的主要原因<sup>[8-9]</sup>。爆破地震波以椭球状的形态向四周传播,使得周围环境产生扰动。目前,评价爆破振动危害效应的参量大多数采用质点峰值振动速度,即爆破振动传播规律一般采用萨道夫斯基公式<sup>[10]</sup>:

$$v = K \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: $v$ 为质点峰值振动速度,cm/s; $K$ 、 $\alpha$ 为与地质条件有关的衰减系数; $Q$ 为单段最大药量,kg; $R$ 为爆心距,m。

式(1)中的 $K$ 、 $\alpha$ 利用监测的质点振动速度与爆心距、起爆药量,并采用线性回归分析方法求得。

### 2.2 测点布置

现场采用的爆破振动监测系统包括记录仪、三向传感器、中科院成都分院自主研发的TC-4850爆破振动测振仪。该仪器设定采样率为8 000 s<sup>-1</sup>,采样时间为2 s,测定质点振动速度量程为34 cm/s,记录延时为-100 ms。对地下巷道展开爆破振动监测,考虑巷道的地质条件,将爆破振动测振仪布置在地下巷道底板,并用石膏把三向传感器固定在基岩上,分别监测测点水平切向、水平径向、竖直方向的峰值振动速度。结合以往的监测经验,此次共布置5个测点,每个测点之间的距离为10 m,编号为1#、2#、3#、6#、7#,测点布置如图1所示。

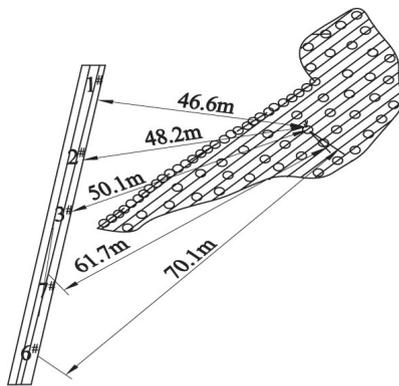


图1 测点布置图

Fig.1 Layout of measuring points

## 3 数据的处理

对爆破近区的地下巷道展开了60余次振动监测试验。通过对监测的爆破振动数据筛选对比,选择其中20组优势数据进行分析,建立测点爆心距与水平切向、水平径向、竖直方向峰值振动速度之间的关系以及爆破峰值振动速度传播规律的数学模型。

由图2所示,竖直方向、水平切向、水平径向峰值振动速度随着爆心距的增加逐渐衰减,在爆心距小于50 m时,水平径向峰值振动速度衰减变化率达到53.63%,而水平切向、竖直方向峰值振动速度衰减变化率分别达到53.07%和47.02%。当爆心距处于50~63 m范围内时,三向峰值振动速度衰减趋势几乎一致,符合爆破振动的衰减规律。但整体上来看,竖直方向的峰值振动速度高于其他两个方

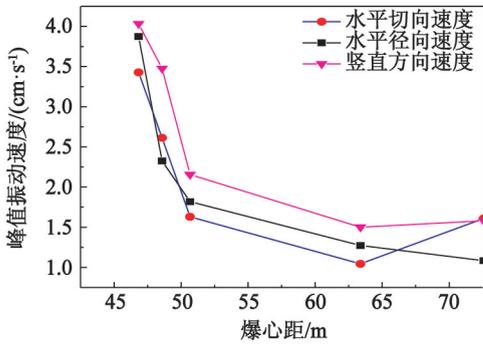


图 2 测点峰值振动速度的变化

Fig. 2 Peak vibration velocity changes of measuring points

向的峰值速度,在探索爆破振动对地下巷道危害效应时应首先考虑测点的竖直方向。

根据图 2 所示,测点竖直方向振动速度大于水平切向、水平径向的峰值振动速度。基于地下巷道的稳定性,以测点的竖直方向峰值振动速度衰减规律作为重点进行分析。对所监测的竖直方向振动速度与爆心距的数据,运用 origin 数学软件对比例距离( $\sqrt[3]{Q} \cdot R^{-1}$ )与竖直方向峰值振动速度展开非线性拟合分析,如图 3 所示。

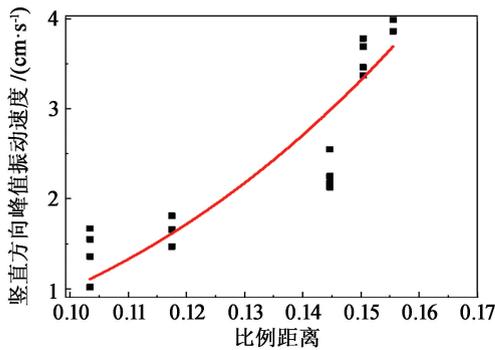


图 3 测点峰值振动速度拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of peak vibration velocity of measuring points

由图 3 可得,爆破振动衰减系数  $K$  与  $\alpha$  分别为 882.64、2.95,即爆破振动传播数学模型为

$$v = 882.64 \left( \frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^{2.95}.$$

该理论公式既可对地下巷道质点爆破峰值振动速度进行预测,判别是否处于安全允许范围之内;又能对现场降低爆破振动危害效应、优化爆破参数提供参考。

## 4 巷道稳定性的数值模拟

对邻近巷道的爆破振动监测分析之后,为了弥

补试验方案中的不足之处,进一步评价爆破载荷对巷道稳定性的影响,应用 FLAC (fast lagrangian analysis of continua) 3D 软件建立巷道概念模型,分析巷道在自重状态下与施加爆破动力荷载后位移、速度等变化规律,为巷道支护措施及优化爆破参数提供理论依据。

### 4.1 FLAC 3D 数值模拟软件

FLAC 3D 起源于美国 Itasca 公司,是 20 世纪 80 年代较为流行的模拟计算软件,同时广泛地适用于采矿、建筑、水利水电等连续介质的分析。FLAC 3D 通过对若干个多面体结构单元进行调整,使得材料的本质结构得以体现;FLAC 3D 通过将 Lagrange 算法与混合-离散分区技术结合起来,更准确地模拟材料的塑性破坏、材料的屈服以及塑性流动。FLAC 3D 较好地模拟相关材料发生一定破坏时的部分力学性质,尤其是在大变形状态下的破坏过程。其中,FLAC 3D 的一个优势在于其计算过程中并不通过刚度矩阵来进行求解,只需通过较小的内存空间就可以解决较为复杂的三维问题。

综上所述,拟采用 FLAC 3D 数值模拟软件分析爆破振动对地下巷道稳定性的影响。

### 4.2 巷道计算概念模型

结合巷道的地质条件,建立 4 m × 4 m 的巷道断面计算模型,如图 4 所示。

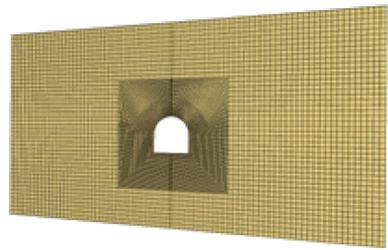


图 4 地下巷道模型

Fig. 4 Model of underground roadway

在自重阶段分析时,将模型的  $x = -20$ 、 $x = 20$ 、 $z = -8$ 、 $y = 0$ 、 $y = 0.5$  平面固定, $z = 14$  的平面设为自由面,对网格体所有区域均定义为弹性模型,密度为 2 500 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量  $E$  为  $1.51 \times 10^4$  MPa,泊松比  $\nu$  为 0.2,体积模量  $K$  与剪切模量  $G$  可由  $E$  和  $\nu$  根据式(2)、式(3)计算求得。

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}; \quad (2)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}. \quad (3)$$

初始条件下不施加任何外力,仅仅考虑其重力,分析巷道及围岩的动态变化规律。

在应用 FLAC 3D 模拟爆破振动对地下巷道稳

定性影响过程中,可将速度时程以及位移时程作为动载荷输入。考虑结果的准确性以及测振仪监测数据,选用测点爆破振动速度时程曲线作为动载荷,模型周围施加为局部阻尼并设为自由边界,通过对巷道底部施加爆破载荷完成巷道在爆破振动下的动力分析。利用爆破振动软件导出监测数据,转换为txt文件,求出最大质点峰值振动速度,即垂直方向速度,最终以命令流的形式进行动力计算。巷道及周围围岩的速度、位移变化情况如图5、图6所示,计算步数设置为6000步,其中按照每1000步记录其变化规律。

图5描述的是爆破载荷作用下巷道及围岩的速度变化情况。由垂直方向速度云图可得:初期阶段,巷道顶板垂直方向速度介于 $4.0 \times 10^{-3} \sim 5.5 \times 10^{-3} \text{ m/s}$ 之间,位于巷道两帮上部0.5 m范围内,远

离巷道的部位质点振动速度逐渐减小;随着爆破地震波的衰减,巷道顶板及底板的垂直方向速度呈递减趋势。整个云图中速度变化主要集中在巷道的顶板及底板,两帮变化较为平缓,应重点监测顶板底板的变化情况。

图6描述的是巷道及围岩垂直方向的位移变化情况。分析图6可知,受到爆破振动影响,巷道变形较为明显。在计算阶段初期,相对于巷道两帮来说,巷道顶板及底板垂直方向位移变化较大,顶板下沉量 $6.13 \times 10^{-5} \text{ m}$ ,发生在距离底板大于3 m的范围内;而底板的下沉量为 $9.05 \times 10^{-5} \text{ m}$ 。随着计算的进行,顶板垂直方向的下沉量逐渐变小,直至趋向平衡,但底板的下沉量却呈现逐渐增大的趋势。到计算终止,底板下沉量达到 $1.67 \times 10^{-4} \text{ m}$ ,大约是初期计算阶段的10倍。对于巷道的两帮,初期时下沉量

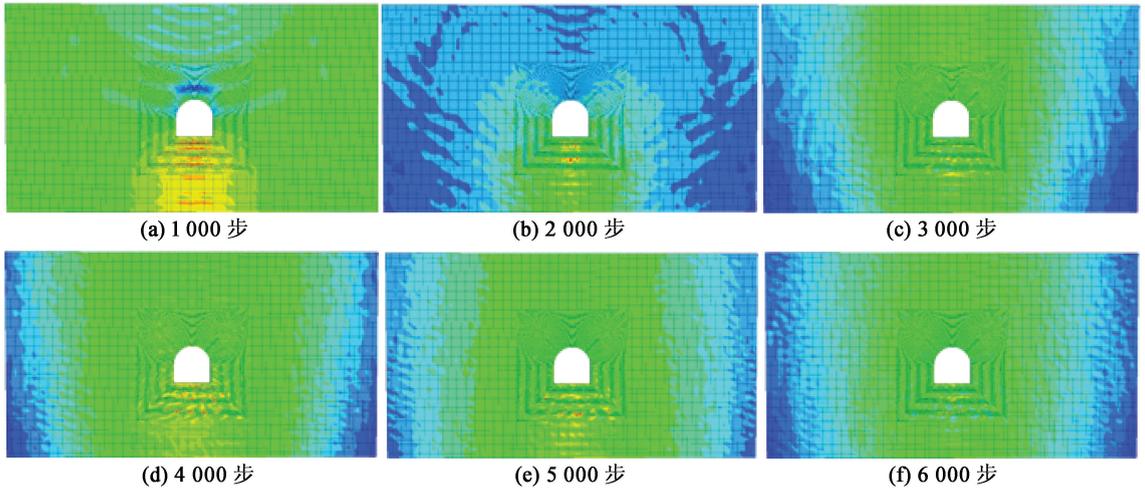


图5 动载荷下巷道及围岩速度变化云图

Fig. 5 Velocity change nephogram of roadway and surrounding rock under dynamic load

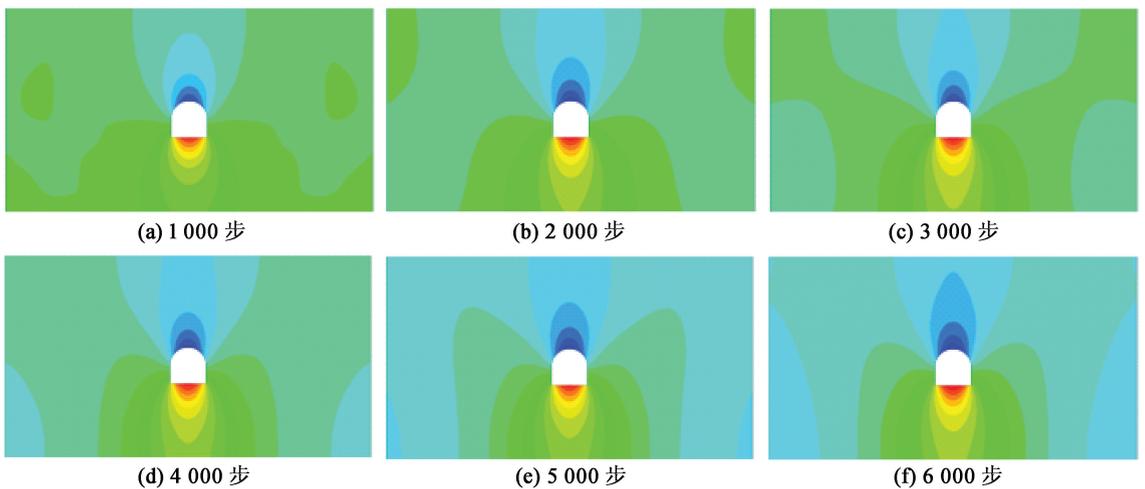


图6 巷道及围岩垂直方向位移变化云图

Fig. 6 Vertical displacement nephogram of roadway and surrounding rock

处于  $1 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-5}$  m, 计算过程中一直保持稳定的状态, 但后期两帮的竖直方向的位移达到  $6 \times 10^{-5} \sim 9 \times 10^{-5}$  m。总体来说, 虽然巷道顶板、底板及两帮均发生了不同程度的下沉, 但都处于巷道的安全允许范围之内。

## 5 结 论

基于露天矿转地下开采巷道监测实例, 确定爆破振动监测方案, 建立了爆破振动传播数学模型, 并利用数值模拟手段进一步对地下巷道稳定性展开了研究, 得出以下结论:

1) 竖直方向、水平切向、水平径向峰值振动速度随着爆心距的增加逐渐衰减。但整体上竖直方向峰值振动速度处于  $1.47 \sim 4.02$  cm/s 之间, 高于水平切向、径向峰值振动速度。

2) 爆心距为 50 m 处是三向峰值速度衰减幅度发生明显变化的转折点, 爆心距小于 50 m 时, 水平径向、水平切向、竖直方向峰值振动速度衰减变化率达到 53.63%、53.07%、47.02%。当爆心距在 50 ~ 63 m 范围内时, 三向峰值振动速度衰减趋势几乎一致, 符合爆破振动的衰减规律。

3) 通过对 FLAC 3D 数值模拟的结果进行分析可以得到, 巷道两帮上部 0.5 m 范围内速度变化较大, 远离巷道的部位质点振动速度逐渐减小, 随着爆破地震波的衰减, 巷道顶板及底板的竖直方向速度呈递减趋势; 受到爆破振动影响, 巷道变形较为明显, 巷道顶板及底板竖直方向位移变化较大, 但都处于巷道的安全允许范围之内。

## 参 考 文 献

- [1] 余海兵, 胡斌, 甘露, 等. 峨眉黄山石灰岩矿露天边坡爆破振动测试与分析[J]. 爆破, 2015, 32(4): 55-59, 68.  
YU H B, HU B, GAN L, et al. Monitoring and analysis of blasting vibration in Ermei Mount Huangshan Limestone Mine open-pit slope[J]. *Blasting*, 2015, 32(4): 55-59, 68.
- [2] 张天文, 才庆祥, 冀宪成, 等. 爆破振动对露天矿边坡稳定性的影响[J]. 金属矿山, 2016(3): 48-52.  
ZHANG T W, CAI Q X, JI X C, et al. Effects of blasting vibration on the slope stability[J]. *Metal Mine*, 2016(3): 48-52.
- [3] SOLTYS A, PYRA J, WINZER J. Analysis of the blast-induced vibration structure in open-cast mines[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2017, 19(1): 409-418.
- [4] 罗学东, 范新宇, 代贞伟, 等. BP 神经网络模型在露天矿爆破振动参数预测中的应用及修正[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(12): 5019-5024.  
LUO X D, FAN X Y, DAI Z W, et al. BP neural network application and model modification in prediction of open-pit mine blasting vibration parameters[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2013, 44(12): 5019-5024.
- [5] 郑儒彬. 复杂环境下爆破振动速度预测模型分析[J]. 工程爆破, 2018, 24(6): 75-79, 90.  
ZHENG R B. Analysis of blasting vibration velocity prediction model in complex environment[J]. *Engineering Blasting*, 2018, 24(6): 75-79, 90.
- [6] 石连松, 高文学, 王林台. 地铁浅埋隧道爆破振动效应试验与数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(12): 1237-1243.  
SHI L S, GAO W X, WANG L T. Experimental and numerical simulation study on blasting seismic effect of subway shallow buried tunnel[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2018, 38(12): 1237-1243.
- [7] 王玉乐, 罗周全, 谢承煜, 等. 深孔爆破对隐患资源开采两帮的动力响应特性研究[J]. 爆破, 2017, 34(4): 33-39.  
WANG Y L, LUO Z Q, XIE C Y, et al. Research on dynamic response characteristics of deep hole blasting for two sides of hidden resources[J]. *Blasting*, 2017, 34(4): 33-39.
- [8] 褚怀保, 叶红宇, 杨小林, 等. 基于损伤累积的爆破振动传播规律试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 173-177.  
CHU H B, YE H Y, YANG X L et al. Experiments on propagation of blasting vibration based on damage accumulation[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(2): 173-177.
- [9] 路世伟. 露天转地下开采边坡爆破振动传播特性及安全判据研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2017.  
LU S W. Propagation characteristic of blasting vibration in slopes subjected to open-pit to underground mining and safety criterion[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2017.
- [10] 李继业, 蒲朝钦, 何兴贵. 节理岩体边坡爆破振动衰减特征分析[J]. 爆破, 2018, 35(2): 32-36, 113.  
LI J Y, PU C Q, HE X G. Analysis of blasting vibration attenuation characteristics of jointed rock mass slope[J]. *Blasting*, 2018, 35(2): 32-36, 113.