

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2020.01.011

# 水平砂泥岩地层隧道爆破振动效应研究\*

种玉配<sup>①</sup> 熊炎林<sup>①</sup> 杨小林<sup>②</sup> 齐燕军<sup>③</sup> 刘书奎<sup>③</sup>

① 中铁隧道局集团有限公司勘察设计研究院(广东广州,511400)

② 河南理工大学土木工程学院(河南焦作,454150)

③ 中国矿业大学力学与土木工程学院(江苏徐州,221116)

[摘要] 为了研究水平砂泥岩地层隧道爆破振动效应,以段家坪隧道为例,采用数值模拟,对拱顶、拱肩、拱腰和拱脚的振速和应力以及节理对应力波传播的影响规律进行分析,将数值模拟和现场爆破振动数据进行对比。结果表明:拱顶处的振速和应力最大;随着岩体中水平岩体层数的增加, $K$ 值减小, $\alpha$ 值增大;水平层状岩体模型中,节理两侧的振速与应力衰减幅度较均质模型中大;由于实际隧道围岩并不是均质的,现场监测振速数据拟合出的振动波衰减指数 $\alpha$ 偏大。

[关键词] 水平砂泥岩;爆破振动;数值模拟;衰减指数

[分类号] TD235

## Study on Blasting Vibration of Tunnels in Horizontal Sand and Mudstone Stratum

ZHONG Yupei<sup>①</sup>, XIONG Yanlin<sup>①</sup>, YANG Xiaolin<sup>②</sup>, QI Yanjun<sup>③</sup>, LIU Shukui<sup>③</sup>

① Survey Design and Research Institute of China Railway Tunnel Group Co., Ltd. (Guangdong Guangzhou, 511400)

② School of Civil Engineering, He'nan Polytechnic University (He'nan Jiaozuo, 454150)

③ School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Jiangsu Xuzhou, 221116)

[ABSTRACT] In order to study the blasting vibration of tunnels in horizontal sand and mudstone stratum, taking Duanjiaping Tunnel as an example, velocity and stress at the various locations of vault, shoulder, waist and foot of arch as well as the influence of joints on the propagation of stress wave were analyzed by numerical simulation. Numerical simulation and field blasting vibration data were compared. Results show that the vibration velocity and stress at the vault top are the largest. With the increase of the number of layers in the rock mass, the  $K$  value decreases and the  $\alpha$  value increases. The attenuation amplitude of vibration velocity and stress on both sides of the joints in the horizontal layered rock mass model is larger than that in the homogeneous model. Due to the inhomogeneous nature of surrounding rock of the actual tunnel, the attenuation index of vibration wave fitted by the in-situ monitoring vibration velocity data is larger.

[KEYWORDS] horizontal sandstone and mudstone; blasting vibration; numerical simulation; attenuation index

## 引言

水平岩层是目前隧道施工作业经常遇到的一种地质构造。隧道光面爆破如果处理不好,隧道拱顶会出现大面积平顶、落石、塌顶等现象,不仅直接影响隧道的光面爆破效果,还会影响隧道的围岩稳定性、初支支护的数量以及二衬混凝土的工程量,增加工程投资<sup>[1-3]</sup>。

王海龙等<sup>[4]</sup>在草帽山隧道爆破中通过线性拟合得到了萨道夫斯基公式的系数,得出爆破地震波主频率随着爆心距的增大而减小。王玲霞<sup>[5]</sup>在阳江1号隧道爆破中得出,隧道纵向的振动衰减速度比横向的振动衰减速度略大。王卓等<sup>[6]</sup>在烧锅隧道爆破中通过FLAC模拟,用萨道夫斯基公式回归拟合各个爆破区段的 $K$ 、 $\alpha$ 值。苑绍东等<sup>[7]</sup>结合青岛地区的地质状况,确定了青岛地铁沿线不同建筑物的安全允许振速、爆破单孔装药量以及施工振动

\* 收稿日期:2019-09-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608520);中铁隧道局集团有限公司科技创新计划项目(2015-13)

第一作者:种玉配(1991-),男,硕士,工程师,主要从事隧道与地下工程科研与管理工。E-mail:815501776@qq.com

影响范围。孙宝平等<sup>[8]</sup>利用数值模拟算法计算得到了岩体特征点的振速,研究了多孔毫秒延期爆破振动规律。江雅勤等<sup>[9]</sup>通过浇花峪隧道的爆破振速,得出拱顶振速拟合出的爆破衰减系数大于其他位置,且拱顶垂直方向振速最大。姬维天等<sup>[10]</sup>对比分析了微差时间间隔分别为25 ms和75 ms的爆破振速和应力,为降低岩体爆破振动损伤提供了依据。

相关学者的研究主要集中在爆破振速、振动衰减系数及振动主频3个方面,而对水平砂泥岩地层隧道爆破振速场和应力场分布以及水平节理对爆破振动响应的影响研究较少。本文中,结合段家坪水平砂泥岩隧道现场情况,采用数值模拟和现场实测,分析水平砂泥岩地层隧道爆破振动传播规律和爆破振动衰减系数,为爆破振速预测和爆破成型开挖提供指导。

## 1 工程概况

段家坪隧道位于蒙华铁路的第九标段,在陕西省延安市宜川县境内。隧道进口里程为DK446+664.02,出口里程为DK457+387.00。隧道全长10 722.98 m,为单洞双线隧道,最大埋深450 m,两处浅埋处最小覆土为3.5 m与14.0 m。隧道所在区域的大地构造部位属于陕甘宁台坳的次一级构造伊陕斜坡,是一个基底硬化程度很高、比较标准的稳定地块。该隧道洞身围岩以三叠系上统厚层砂岩、粉砂岩、夹薄层泥岩为主,岩层产状倾向272°、倾角2°,砂岩、粉砂岩节理裂隙较发育。

## 2 数值模拟

### 2.1 材料参数

在ANSYS/LS-DYNA中,一般采用高性能炸药材料\*Mat\_High\_Explosive\_Burn来模拟炸药的爆

轰,采用状态方程\*EOS\_JWL来描述爆炸时炸药材料的压力特征,同时可以描述炸药爆炸产生的单位体积的内能、爆轰产物的压力和相对体积参数。本次模拟中使用炸药的具体参数见表1。

一般采用\*Mat\_Plastic\_Kinematic来描述岩石材料,这是一种考虑了材料失效的随动硬化、各向同性以及应变率有关的模型,砂岩和泥岩的力学参数见表2。

空气和炮泥材料模型与参数见文献[11-12]。

### 2.2 数值模型建立

段家坪隧道开挖高度为9 m,开挖宽度为12 m。整个模型的尺寸为5 400 cm×2 600 cm×3 200 cm(单位制为cm-g- $\mu$ s),模型四周设置无反射边界条件。对现场的炮孔布置进行了简化,一共设置了6个掏槽眼、9个辅助眼和9个周边眼。根据现场水平砂泥岩地层条件,模型上表面采用自由边界,其余的面均采用无反射边界。采用等距网格对计算模型中的炸药、岩石、空气和炮泥介质进行划分,整个模型共划分出172 378个节点、158 775个单元,建立了均质岩体模型以及一层、二层、三层和四层水平岩体模型。

### 2.3 数值计算结果

#### 2.3.1 振动场和应力场分布规律

一、二、三、四层水平岩体模型如图1所示。提出4个模型中拱顶、拱肩、拱腰和拱脚附近的振速和应力数据,如图2和图3所示。

从图2和图3可知,同一种计算模型中,振速峰值和应力峰值均表现出从拱顶到拱肩、拱腰、最后到拱脚逐渐减小的顺序。在同一位置处,振速峰值和应力峰值均从一层到二层、三层、最后到四层水平岩体模型逐渐减小。拱顶附近节点的振速和单元应力值均较大,说明爆破载荷对该区域围岩造成的损伤较大,易产生超挖现象,在施工时对该区域的装药参数应予以特殊考虑。

表1 炸药及状态方程主要参数

Tab. 1 Main parameters of explosive in state equation

| $\rho/(g \cdot cm^{-3})$ | $D/(m \cdot s^{-1})$ | $p_{c,j}/GPa$ | $A/GPa$ | $B/GPa$ | $R_1$ | $R_2$ | $\omega$ | $E/GPa$ |
|--------------------------|----------------------|---------------|---------|---------|-------|-------|----------|---------|
| 1.05                     | 4 018                | 18.5          | 216.7   | 0.184   | 4.2   | 0.9   | 0.15     | 4.192   |

表2 岩石材料参数

Tab. 2 Parameters of rock

| 岩体 | $\rho/(g \cdot cm^{-3})$ | $\mu$ | $E/GPa$ | $\sigma/MPa$ | $E_t/GPa$ | $\varepsilon$ | $\sigma_b/MPa$ |
|----|--------------------------|-------|---------|--------------|-----------|---------------|----------------|
| 砂岩 | 2.6                      | 0.32  | 3.8     | 42.68        | 2         | 3.5           | 2.15           |
| 泥岩 | 2.1                      | 0.24  | 2.2     | 10.45        | 1         | 2.5           | 1.25           |

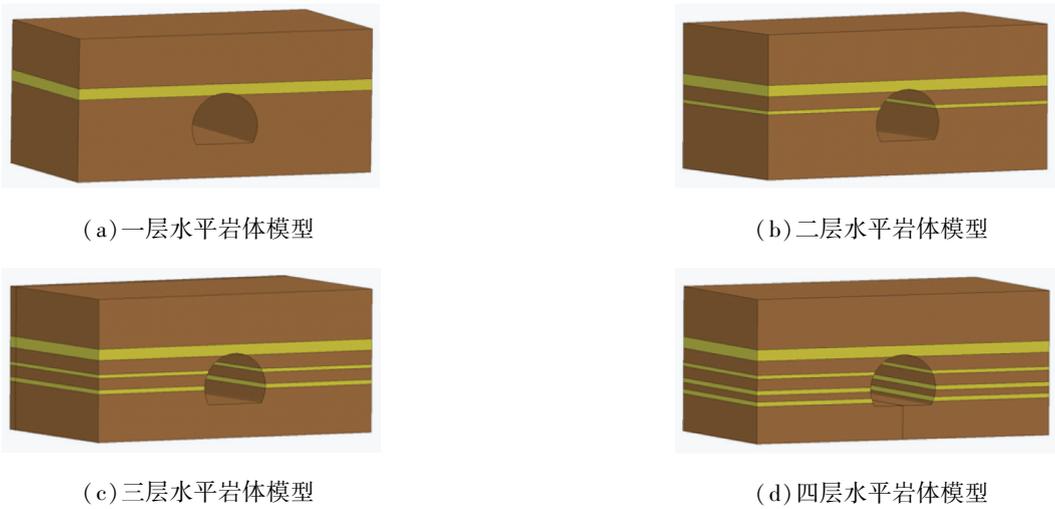


图 1 数值模型

Fig. 1 Numerical model

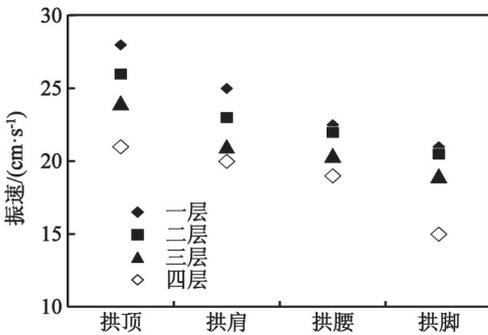


图 2 振速随位置的变化

Fig. 2 Vibration velocity varying with position

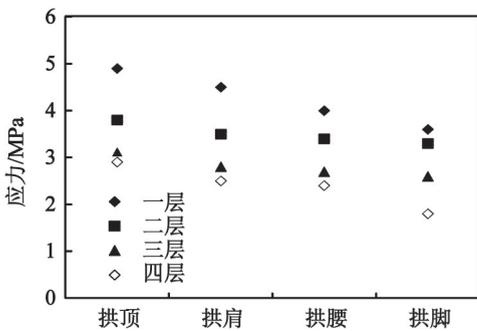


图 3 应力随位置的变化

Fig. 3 Stress varying with position

### 2.3.2 振动波传播规律

在一层、二层、三层和四层水平岩体模型的隧道底板上分别提取 20 个节点的垂向振速数据,利用萨道夫斯基公式进行回归分析,得出每种岩体模型的回归方程,分别如式(1)~式(4)所示。

一层水平岩体模型

$$v = 265.46 \left( \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.44}; \quad (1)$$

二层水平岩体模型

$$v = 250.03 \left( \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.52}; \quad (2)$$

三层水平岩体模型

$$v = 239.88 \left( \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.60}; \quad (3)$$

四层水平岩体模型

$$v = 210.97 \left( \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.82}。 \quad (4)$$

式(1)~式(4)中: $R$ 为测点至爆源的距离,m; $Q$ 为单段最大药量,kg; $v$ 为质点振速峰值,cm/s。

统计不同模型中的 $K$ 、 $\alpha$ 值,见表3。 $K$ 为与岩石性质、地质条件等有关的系数; $\alpha$ 为爆破振动衰减系数。

表 3 不同模型中的 $K$ 、 $\alpha$ 值

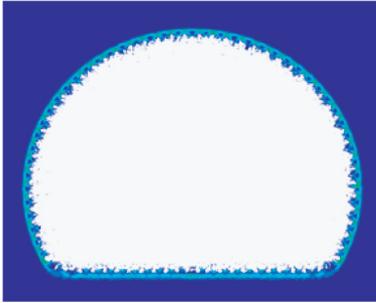
Tab. 3  $K$  and  $\alpha$  in different models

| 数值模型   | $K$    | $\alpha$ |
|--------|--------|----------|
| 一层水平岩体 | 265.45 | 1.44     |
| 二层水平岩体 | 250.03 | 1.52     |
| 三层水平岩体 | 239.88 | 1.60     |
| 四层水平岩体 | 210.97 | 1.82     |

由表3可以看出,随着岩体中水平岩体层数的增加, $K$ 值减小, $\alpha$ 值增大。由于水平岩体的存在会对爆炸应力波的传播起阻隔作用,层数越多,阻隔作用越强,所以应力波衰减指数随着岩体中水平岩层层数的增加而增加;而不同模型之间由于水平岩层层数的增加,场地系数 $K$ 出现了逐渐减小的规律。

### 2.3.3 节理对应力波影响作用分析

建立了均质岩体和水平层状岩体的周边眼光面爆破岩体模型。采用较为密集的网格进行计算,共建立了70个周边孔,炮孔半径2 cm,孔间距50 cm。爆破效果如图4所示。



(a) 均质岩体



(b) 水平层状岩体

图4 周边眼光面爆破效果

Fig. 4 Effect of smooth blasting with peripheral eyes

由图4可知,均质岩体由于岩性较好,得到的爆破断面轮廓光滑度较高;而对于水平层状岩体来说,由于应力波的传播受到层状节理的阻碍,造成爆炸能量分布不均衡,得到的断面轮廓凹凸不平,并且在隧道拱顶处出现类似矩形门框形状。选取水平层状岩体模型拱顶处节理两侧的节点和单元,提取节点振速和单元应力。同时,在均质岩体模型中提取同位置的节点振速和单元应力,见表4。

表4 节点的振动速度和单元应力

Tab. 4 Vibration velocity and unit stress of nodes

| 指标   | 水平层状岩体模型 |      | 均质岩体模型 |       |
|--|----------|------|--------|-------|
|  | 节理下侧     | 节理上侧 | 节理下侧   | 节理上侧  |
| 节点振速/<br>( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) | 15.60    | 9.35 | 13.90  | 10.20 |
| 单元应力/<br>MPa                                 | 6.65     | 2.85 | 5.20   | 2.88  |

从表4可知,水平层状岩体模型中,节理上、下两侧的振速衰减了40.06%;均质岩体模型中,相同

位置处的振速衰减了26.62%。水平层状岩体模型中,节理上、下侧的应力衰减了57.14%;均质岩体模型中,相同位置处的应力衰减了44.61%。

与均质岩体相比,水平层状岩体模型中节理两侧的振速与应力衰减幅度较大,说明层状节理的存在对应力波的传播具有一定的阻碍作用;水平层状岩体模型中,节理下侧节点的振速与应力比均质岩体模型中同位置处的振速与应力大,这是因为应力波最先在节理下侧发生反射,反射波与入射波的相互叠加产生应力集中现象,导致振速与应力增大。

## 3 现场爆破振动监测

### 3.1 爆破振动测试内容

结合段家坪隧道现场的实际施工情况,采用TC-4850爆破测振仪提取隧道内部相关点的振速数据,然后采用最小二乘法对所测数据进行回归分析,计算出所测爆破场地的 $K$ 和 $\alpha$ 值,建立质点振动公式。

### 3.2 爆破振动测试方法

测试时,将感应探头放在和掌子面一定距离处的隧道底板上。选取隧道底板上较为平整的区域,在碎石表面涂抹黄油,然后撒布粒径更小的碎石和渣土,在感应探头底部抹上黄油,使传感器与碎石、渣土贴合较好。记录每次起爆的单段最大药量。

由于感应探头距离掌子面较近,为了防止爆破飞石破坏仪器,设置仪器参数后,用特制的铁盒子盖上仪器。如图5所示。起爆前,人员撤离至洞外;爆破结束后,进洞取走仪器,然后将仪器与计算机连接,利用配套的爆破振动波分析软件BVA(blasting vibration analysis)对本次的振动波数据进行提取。



图5 现场仪器布置图

Fig. 5 Layout of field instruments

### 3.3 爆破振动测试数据分析

提取30组垂向振速数据进行回归分析,数据经整理后见表5。

表 5 垂向振动测试数据统计

Tab. 5 Statistics of vertical vibration test data

| 数据编号            | 振速/(cm·s <sup>-1</sup> ) | 比例距离/(m·kg <sup>-1/3</sup> ) |
|-----------------|--------------------------|------------------------------|
| 1 <sup>#</sup>  | 3.819 05                 | 0.141 73                     |
| 2 <sup>#</sup>  | 1.719 96                 | 0.094 73                     |
| 3 <sup>#</sup>  | 2.256 02                 | 0.108 64                     |
| 4 <sup>#</sup>  | 3.114 92                 | 0.127 87                     |
| 5 <sup>#</sup>  | 2.047 27                 | 0.103 45                     |
| 6 <sup>#</sup>  | 0.993 54                 | 0.071 80                     |
| 7 <sup>#</sup>  | 4.365 94                 | 0.151 64                     |
| 8 <sup>#</sup>  | 3.486 78                 | 0.135 36                     |
| 9 <sup>#</sup>  | 5.036 58                 | 0.162 99                     |
| 10 <sup>#</sup> | 3.819 05                 | 0.141 73                     |
| 11 <sup>#</sup> | 2.451 69                 | 0.113 31                     |
| 12 <sup>#</sup> | 3.277 12                 | 0.131 19                     |
| 13 <sup>#</sup> | 1.308 56                 | 0.082 52                     |
| 14 <sup>#</sup> | 0.970 32                 | 0.070 95                     |
| 15 <sup>#</sup> | 3.277 12                 | 0.131 19                     |
| 16 <sup>#</sup> | 1.140 42                 | 0.076 98                     |
| 17 <sup>#</sup> | 1.172 34                 | 0.078 06                     |
| 18 <sup>#</sup> | 1.359 28                 | 0.084 12                     |
| 19 <sup>#</sup> | 2.013 79                 | 0.102 59                     |
| 20 <sup>#</sup> | 2.086 20                 | 0.104 43                     |
| 21 <sup>#</sup> | 2.354 19                 | 0.111 01                     |
| 22 <sup>#</sup> | 0.689 88                 | 0.059 72                     |
| 23 <sup>#</sup> | 0.657 41                 | 0.058 28                     |
| 24 <sup>#</sup> | 0.673 81                 | 0.059 01                     |
| 25 <sup>#</sup> | 3.249 45                 | 0.130 63                     |
| 26 <sup>#</sup> | 2.657 89                 | 0.118 02                     |
| 27 <sup>#</sup> | 1.988 15                 | 0.101 93                     |
| 28 <sup>#</sup> | 1.040 37                 | 0.073 49                     |
| 29 <sup>#</sup> | 2.090 93                 | 0.104 55                     |
| 30 <sup>#</sup> | 3.271 86                 | 0.131 08                     |

得出的回归公式为:

$$v = 181.97 \left( \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{R} \right)^{1.98} \quad (5)$$

对比式(5)和式(4)可以发现:采用数值模拟和现场测试两种方式计算得到的  $K$  和  $\alpha$  值相差并不大。这说明数值模型的建立是比较合理的,模拟的结果具有一定的参考价值。

同时也可以看到,采用现场监测振速数据拟合出的振动波衰减指数  $\alpha$  偏大。这是因为实际中岩石并不是均质的,内部都含有裂隙或其他不良结构,这对地震波的衰减影响很大;而且测量时放置的地面上存在大量的碎石和渣土,这对测量的准确性也

有一定的影响;而数值模型中只设置了 4 条层状节理,这与实际的地质条件也有一定出入。

## 4 结论

通过对水平砂泥岩地层隧道中不同水平岩层的爆破开挖数值模拟和爆破振动数据的现场测试,得到了隧道拱顶、拱肩、拱腰和拱脚的振速和应力,对比数值模拟和现场测试的数据,得到以下结论:

1)同一种计算模型中,振速峰值和应力峰值均表现出从拱顶到拱肩、拱腰、最后到拱脚逐渐减小的顺序。在同一位置处,振速峰值和应力峰值均从一层到二层、三层、最后到四层水平岩体模型逐渐减小。随着岩体中水平岩体层数的增加, $K$  值减小, $\alpha$  值增大。

2)与均质岩体相比,水平层状岩体模型中节理两侧的振速与应力衰减幅度较大,说明层状节理的存在对应力波的传播具有一定的阻碍作用。

3)数值模拟和现场测试计算得到的  $K$  和  $\alpha$  值相差并不大,说明数值模型的建立是比较合理的。由于实际隧道围岩并不是均质的,使得现场监测振速数据拟合出的振动波衰减指数  $\alpha$  偏大。

## 参 考 文 献

- [1] 苑俊廷. 水平层状围岩隧道初期支护参数研究[J]. 铁道建筑,2016(4):56-59.  
YUAN J T. Study on primary support parameters of tunnel in horizontal layered surrounding rock [J]. Railway Engineering,2016(4):56-59.
- [2] 李顺波. 水平缓倾岩层大断面隧道安全快速施工技术研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2016.  
LI S B. The technical research of safely and rapidly construction on large section tunnel of horizontal gently inclined rock [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University,2016.
- [3] 刘鹏,吉锋,温书亿. 隧道水平岩层变形破坏机制的模拟研究[J]. 现代隧道技术,2015,52(3):82-87.  
LIU P, JI F, WEN S Y. Simulation study on the deformation and failure mechanism of level rock in tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2015,52(3):82-87.
- [4] 王海龙,赵岩,王永佳,等. 草帽山隧道爆破振动监测与分析[J]. 铁道建筑,2017,57(12):67-70.  
WANG H L, ZHAO Y, WANG Y J, et al. Blasting vibration monitoring and analysis of Caomaoshan tunnel [J]. Railway Engineering,2017,57(12):67-70.

- [5] 王玲霞. 公路隧道爆破振动波的传播规律研究[J]. 公路, 2018(5):332-336.
- [6] 王卓, 刘麒梁, 付双双, 等. 基于萨道夫斯基公式分段拟合的烧锅隧道爆破振动预测研究[J]. 公路, 2017(8):311-315.
- [7] 苑绍东, 杨林, 黄舰. 青岛地区地铁隧道爆破施工影响范围研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(3):76-80, 91. YUAN S D, YANG L, HUANG J. Scope affected by metro tunnel construction blasting in Qingdao Metro[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(3):76-80, 91.
- [8] 孙宝平, 高文学, 周世生. 隧道掘进爆破破岩数值模拟及应用研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(10):1025-1029, 1036. SUN B P, GAO W X, ZHOU S S. Study on numerical simulation and application of blasting of tunnel excavation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2018, 38(10):1025-1029, 1036.
- [9] 江雅勤, 刘殿书, 武宇, 等. 兴延高速浇花峪隧道爆破振动测试分析研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(2):224-231. JIANG Y Q, LIU D S, WU Y, et al. Experimental analysis of blasting vibration of Jiaohuayu Tunnel on Xingyan Expressway in Beijing[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(2):224-231.
- [10] 姬维天, 刘洪震. 水平层状岩体隧道爆破开挖数值模拟及振动效应研究[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2016, 26(4):27-30. JI W T, LIU H Z. Numerical simulation and vibration effect on horizontal layered rock mass blasting excavation [J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 26(4):27-30.
- [11] 种玉配, 熊炎林, 齐燕军. 轴向不耦合装药结构形式优化仿真研究[J]. 工程爆破, 2018, 24(2):1-7. ZHONG Y P, XIONG Y L, QI Y J. Simulation study of optimization on the axial uncoupling charging structure [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(2):1-7.
- [12] 熊炎林, 种玉配, 齐燕军, 等. 聚能爆破在隧道开挖成型控制中的仿真试验研究[J]. 爆破器材, 2019, 48(4):54-59. XIONG Y L, ZHONG Y P, QI Y J, et al. Simulation test of shaped charge blasting in shaping control of tunnel excavation [J]. Explosive Materials, 2019, 48(4):54-59.

## 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