

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.021

## 小近距隧道扩挖爆破作用下邻洞振动响应研究\*

林立宏<sup>1</sup>,倪迪<sup>1</sup>,朱爱山<sup>2</sup>,彭亚雄<sup>3</sup>,吴立<sup>4</sup>

(1. 台州市交通投资集团有限公司,台州 318000;2. 浙江省隧道工程集团有限公司,杭州 310005;

3. 湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室,湘潭 411201;

4. 中国地质大学(武汉)工程学院,武汉 430074)

**摘要:** 在小近距隧道扩挖工程中,隧道爆破引起邻洞振动,对既有隧道结构稳定性造成较大影响。为研究爆破作用下邻洞隧道振动响应特征,依托浙江省温岭市楼山隧道扩挖工程,采用现场振动测试试验和数值模拟方法,研究爆破作用下邻洞隧道振动特征及衰减规律,并对比了爆破隧道与邻洞隧道振动响应差异性。结果表明:爆破掏槽段炸药引起的隧道振动最大。在爆破近区,隧道扩挖爆破对邻洞隧道振动响应的影响更大。邻洞隧道的迎爆侧离爆源近,隧道振动强度大;既有隧道空间对振动衰减作用较大,背爆侧的振动强度相对较小。

**关键词:** 小近距隧道;扩挖;爆破作用;邻洞隧道;振动速度

中图分类号: TD235.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2020)01-0145-06

## Study on Vibration Response of Adjacent Tunnel Induced by Expansion Excavation Blasting of Closely-spaced Tunnels

LIN Li-hong<sup>1</sup>, NI Di<sup>1</sup>, ZHU Ai-shan<sup>2</sup>, PENG Ya-xiong<sup>3</sup>, WU Li<sup>4</sup>

(1. Taizhou Communications Investment Group, Taizhou 318000, China; 2. Zhejiang Tunnel Engineering Group, Hangzhou 310005, China; 3. Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China; 4. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In the expansion excavation project of closely-spaced tunnels, the blast vibrations from the tunnel under construction have a great influence on the stability of the existing adjacent tunnel. Based on the expansion excavation project of Loushan Tunnel in Wenling City, Zhejiang Province, the vibration characteristics and attenuation law of the adjacent tunnel under blasting effects were studied by field vibration tests and numerical simulation. In addition, the vibration response from the tunnel under blasting construction was compared with that of the adjacent tunnel. The results show that the vibrations induced by cut holes have the largest amplitudes. The vibration response of the adjacent tunnel is more influenced by the near-area blasting. The vibration intensity of the adjacent tunnel is higher on the side closer to the blasting site. Whereas the vibration intensity of reverse side is relatively lower for the existing tunnel space has a great attenuation effect on vibration.

**Key words:** closely-spaced tunnels; expansion excavation; blasting effect; adjacent tunnel; vibration velocity

收稿日期:2019-12-16

作者简介:林立宏(1975-),男,高级工程师,主要从事公路工程建设管理,(E-mail)1059309247@qq.com。

通讯作者:吴立(1963-),男,湖南株洲人,教授,主要研究爆破与岩石动力学,(E-mail)lwu@cug.edu.cn。

基金项目:浙江省交通运输厅科研项目(2018013);国家自然科学基金(41672260)

随着我国经济的高速发展和城市建设的不断完善,已有双向四车道隧道已经无法满足现有交通的需要。对既有隧道进行原位扩建,是一种相对经济且有效的方法,可以满足现在的交通流量及需

求。意大利和日本最早开始探索既有隧道扩挖改造工程及相关研究,意大利的纳扎诺公路隧道扩挖成3车道;日本提出了一套适用于多种岩性、各类断面的隧道扩挖施工方法<sup>[1-3]</sup>。我国近年来也逐步开展了隧道扩挖工程及相关研究<sup>[4,5]</sup>。杨小礼等对比分析了既有隧道扩挖和新建隧道施工的力学差异<sup>[6]</sup>,从位移、应力和安全系数方面分析了既有隧道扩挖的稳定性。彭泽森等采用数值模拟方法研究不同的爆破开挖方案对隧道周边岩土体的影响<sup>[7]</sup>。吴慧等针对复杂环境下既有浅埋隧道扩挖工程特点,提出了隧道超前开挖、台阶钻爆法、光面爆破技术等爆破安全措施<sup>[8]</sup>,并应用于实际工程。

由于既有隧道建设年代较为久远,存在衬砌弱化、背面空洞、围岩变形等问题,隧道结构可靠性降低<sup>[9]</sup>。爆破振动将对既有隧道稳定性产生较大威胁<sup>[10,11]</sup>。孟凡兵等和郑明新等均采用数值方法研究了爆破振动对邻近隧道衬砌结构的影响<sup>[12,13]</sup>。李凤等研究了隧道开挖引起的围岩振速和拉应力的关系及其分布规律<sup>[14]</sup>。汪波等模拟岩溶地区衬砌背后有可能存在大型空洞的现象,研究了爆破作用下含空洞隧道结构的动力响应<sup>[15]</sup>。

小间距隧道扩挖爆破对邻洞隧道影响较大。本文依托浙江省温岭市楼山隧道扩建工程,通过现场测试试验和数值模拟,研究爆破作用下邻洞隧道振动响应特征及衰减规律。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

楼山隧道位于浙江省温岭市楼山村,是温岭市路泽太一级公路的重要组成部分。为有效缓解公路交通压力,发挥省级干线公路的联通优势和整体效益,建设综合性城市交通网络。需对路泽太一级公路进行改扩建工程,将既有双向四车道的楼山隧道,原位扩建为双向八车道隧道。该工程是目前国内最大断面的二扩四车道隧道施工项目。

既有楼山隧道是温岭市的主要交通要道,目前

正在使用且交通流量较大。为了保证交通,隧道扩挖采用一洞改建,另一洞保持交通的施工方案。扩建隧道的爆破作业必须确保通行隧道的安全。

### 1.2 隧道及爆破设计

既有楼山隧道为分离式小间距隧道,左线实际长度530.5m,右线实际长度509.6m,隧道净断面为10.25m×5m,隧道两幅最小间距29~35m。改扩建后的楼山隧道全长508m,隧道断面为17.25m×5m,隧道两幅最小间距25~31m。隧道区域内揭露的地层属于前第四纪地层主要为侏罗纪西山头组( $J_{3x}$ )。岩性以紫红色晶屑、玻屑凝灰岩为主,岩体质硬而较破碎。地下水的化学成分均以 $\text{NaHCO}_3$ 为主,对既有隧道衬砌具有一定的腐蚀性;在长期浸水或干湿循环条件下可能导致衬砌强度降低。

隧道扩挖施工前,对既有隧道下半断面进行回填压实,形成临时底板,并在底板上设置临时仰拱。施工采用括弧双侧壁分部开挖方法,首先对上台阶I部分的岩体及既有衬砌进行爆破开挖,然后依次开挖出整个断面,开挖过程及I部分炮孔布置如图1所示。

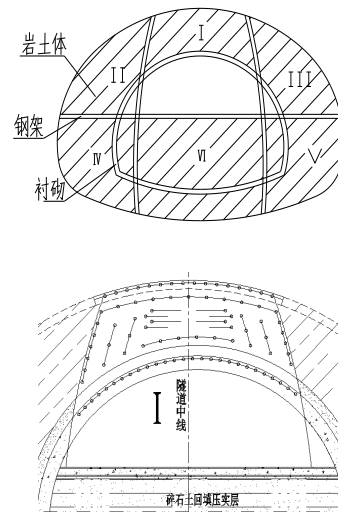


图1 开挖流程与爆破设计

Fig. 1 Excavation procedure and blasting design

表1 分部开挖爆破设计参数

Table 1 Blasting design parameters of each section

扩挖分部	孔深/m	单孔药量/kg	单段最大药量/kg	总药量/kg	爆破延时
I(围岩)	1.1~1.7	0.15~0.90	4.50	23.10	MS1~MS15
I(衬砌)	1.1	0.60	4.80	15.60	MS1~MS7
II和III	1.1~1.3	0.15~0.75	4.80	25.50	MS1~MS15
IV和V	1.8~2.0	0.30~1.20	6.75	36.00	MS1~MS13
VI	1.8	0.75~0.90	6.75	52.95	MS1~MS15

## 2 振动测试试验

### 2.1 试验方案

工程采用一洞改建,另一洞保持交通的施工方案;同时由于既有隧道已经服役多年,隧道衬砌本身可能存在脱空、裂纹等,爆破作用下邻洞隧道动力响应必须重点关注,以确保隧道安全及稳定。为了研究爆破作用下邻洞隧道振动特性及衰减规律,并有效地控制爆破地震波有害效应,开展了现场试验及监测。在邻洞靠近爆破隧道一侧的拱墙下部,设置一条共 5 个监测点水平测线。从与爆破面平行位置起,每间隔 20 m 设置一个测点,监测点布置如图 2 所示。

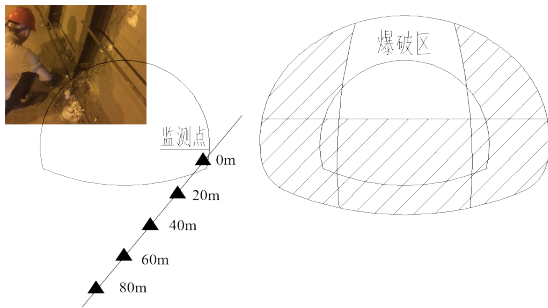


图 2 监测点布置示意图

Fig. 2 The position of monitoring point

### 2.3 试验结果及分析

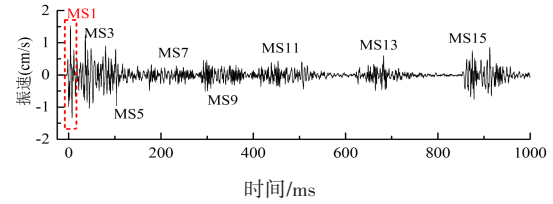
现场测试试验采用 UBOX-5016 爆破振动智能监测仪,仪器测试频率为 3200 sps,测试持续时间 1.0 s,负延时为 50 ms。通过 3 次测试试验,获得了 15 组爆破振动测试数据。邻洞隧道的振动时程典型曲线如图 3 所示,监测数据如图 4 所示。

从图 3 可以明显分辨出各延时爆破引起的振动历程及峰值振速。由于各段装药量和自由面的影响,各延时爆破引起的峰值振速差异明显。对比水平径向、水平切向和垂直方向三个方向的振动时程特征,峰值振速最大值均由 MS1 段引起,这是因为 MS1 段为掏槽眼,装药密度和药量最大,且自由面最少。三个方向分别为 1.532 cm/s、1.062 cm/s、1.182 cm/s,水平径向峰值振速最大,而水平切向峰值振速最小。

采用萨道夫斯基公式对现场监测结果进行拟合,监测数据及拟合结果如图 4 所示<sup>[16]</sup>。拟合决定系数  $r^2$  为 0.901,说明拟合精确度较好,能够较好地反映爆破作用下邻洞振动衰减规律。

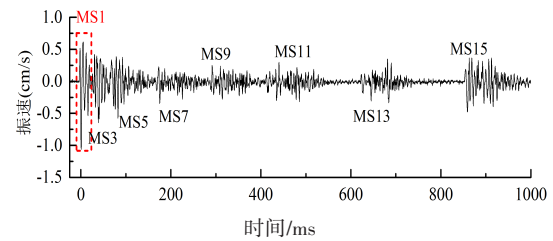
$$v = 120.51 \times \left( \frac{Q^{1/3}}{R} \right)^{1.41} \quad (1)$$

式中: $v$  为峰值合速度,cm/s; $Q$  为单段最大药量,kg; $R$  为爆心距,m; $Q^{1/3}/R$  为距离比例药量,其取值范围为 0.0185~0.0482。



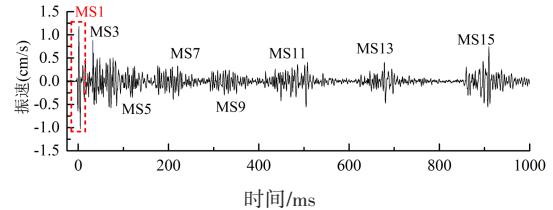
(a) 水平径向

(a)Horizontal radial



(b) 水平切向

(b)Horizontal tangential



(c) 垂直方向

(c)vertical direction

图 3 振动时程典型曲线

Fig. 3 The typical curve of the vibration time history

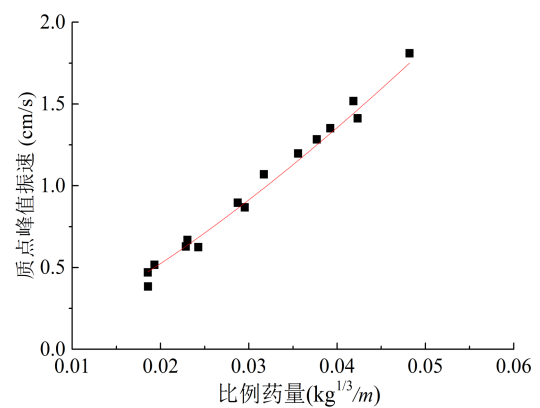


图 4 峰值振速拟合曲线

Fig. 4 Fitting curve of peak pressure of water shock wave

## 3 数值模拟分析

### 3.1 数值模型

为了进一步研究爆破作用下邻洞隧道的振动响应特征,采用 Ls-dyna 建立了小近距隧道扩挖动

力有限元模型。数值计算模型三维尺寸为95.83 m×85 m×120 m。模型材料由岩土体、炸药、衬砌、钢拱架和空气5个部分组成,采用cm-g-μs单位制。根据上述现场试验结果,爆破作用下邻洞隧道的峰值振速由掏槽眼(MS1)引起,为了简化计算,本模型研究上台阶I部分掏槽眼爆破。

模型中2号岩石乳化炸药采用MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN模型,参数如表2所示;围岩及衬砌采用\*MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC模型,参数如表3和表4所示;空气采用\*MAT\_NULL模型,参数如表5所示;钢架采用\*MAT\_JOHNSON\_COOK模型,参数如表6所示。岩石、衬砌和钢拱架使用Lagrange网格,炸药和空气使用Euler网格,边界条件这是为Non-reflection边界。

### 3.2 模拟结果分析

为了分析隧道扩挖爆破振动响应规律,故在爆破隧道和邻洞隧道分别布置一条测线,每条测线共

选取5个测点,爆心距分别为40 m、50 m、60 m、80 m、100 m。爆破隧道选取左侧拱脚单元,邻洞隧道则与现场试验一致。振速时程曲线如图6所示,各测点峰值振速如表7所示。

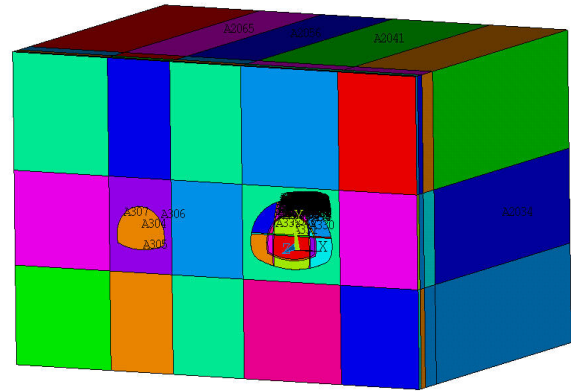


图5 数值模拟模型图

Fig. 5 Numerical simulation model diagram

表2 炸药的计算参数

Table 2 Parameters of explosive

密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	爆速 $D/(m \cdot s^{-1})$	A/GPa	B/GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	E/GPa	V
1.64	4000	$3.74 \times 10^2$	$3.23 \times 10^{-2}$	4.15	0.95	0.3	7.0	1.0

表3 岩土体的计算参数

Table 3 Parameters of rock masses

密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	泊松比 $\nu$	屈服强度 $\sigma_s/MPa$	弹性模量 E/GPa	剪切模量 G/MPa	硬化系数 n
2.68	0.22	5.5	0.228	22	0.5

表4 衬砌的计算参数

Table 4 Parameters of lining

密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	泊松比 $\nu$	弹性模量 E/GPa	剪切模量 G/MPa
2.67	0.25	0.202	22

表5 空气的计算参数

Table 5 Parameters of air

密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$\mu$	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	E
$1.29 \times 10^{-3}$	1.0	$-1.00 \times 10^{-6}$	0	0	0	0.4	0.4	0	$2.500 \times 10^{-6}$

表6 钢架的计算参数

Table 6 Parameters of steel frame

密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	剪切模量 G/MPa	弹性模量 E/GPa	硬化指数 n	初始内部能量 $E_0/J$
7.83	0.77	206	0.26	0

由图6和表7对比爆破隧道和邻洞隧道振动响应特征。在爆心距40 m位置,即邻洞隧道与爆破断面平行位置,其右侧拱脚出振速值为1.609 cm/s大于相同爆心距下爆破隧道;随爆心距增加,爆破隧

道和邻洞隧道的峰值振速均而减小;在爆心距100 m位置,爆破隧道峰值振速大于邻洞隧道。说明在爆破近区,隧道扩挖爆破对邻洞隧道振动响应的影响更大,随着爆心距的增加其振动衰减也更快。

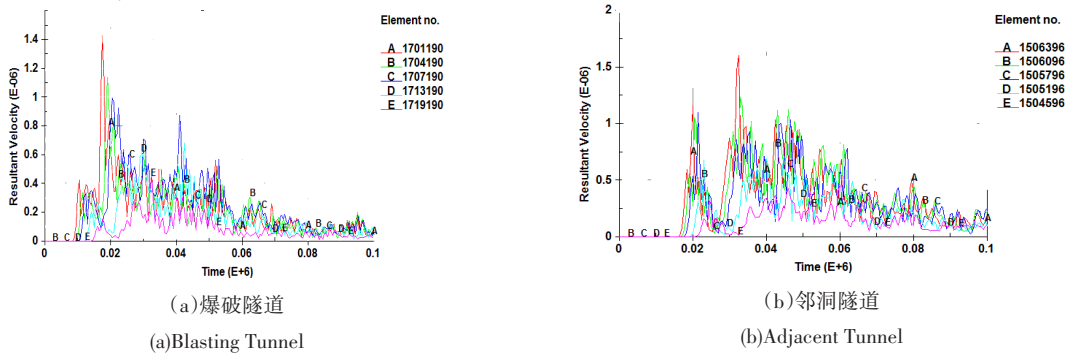


图 6 振速时程曲线图

Fig. 6 Time history curve of vibration velocity

表 7 各测点峰值振速

Table 7 Peak vibration velocity of each measuring point

爆心距 $R/m$	40	50	60	80	100
峰值振速 $V/(cm \cdot s^{-1})$					
爆破隧道	1.425	1.145	1.001	0.685	0.477
邻洞隧道	1.609	1.235	1.100	0.705	0.459

与爆破断面平行位置是邻洞隧道最危险断面,爆破施工中应为重点监控范围。分别取拱顶、拱腰、拱脚及拱底单元为监测点,获得各点峰值振速如表 8 和图 7 所示。

表 8 最危险断面峰值振速

Table 8 Peak vibration velocity of the most dangerous surface

位置	拱顶	右侧拱腰	右侧拱脚	拱底	左侧拱脚	左侧拱腰
峰值振速 $(cm \cdot s^{-1})$	0.836	1.761	1.609	0.498	0.171	0.219

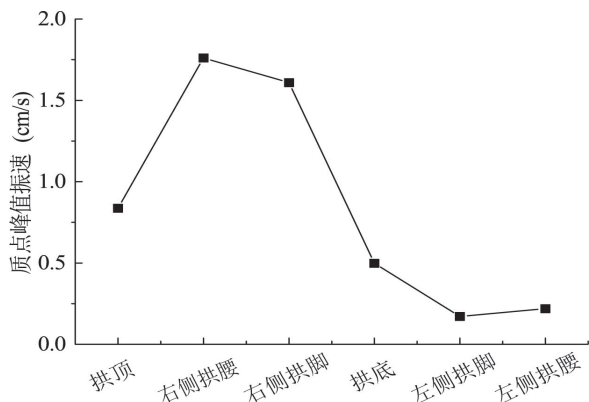


图 7 最危险断面峰值振速图

Fig. 7 Time history curve of vibration velocity

由表 8 和图 7 可知,邻洞隧道最危险断面上,峰值振速最小值出现在左侧拱脚位置,为 0.171 cm/s;最大值在右侧拱腰位置,为 1.761 cm/s,小于爆破设

计要求振速安全控制值 2.5 cm/s。隧道断面右侧为迎爆面,其峰值振速均大于隧道左侧。由于数值模型模拟是上台阶 I 部分掏槽眼爆破,因此拱顶峰值振速大于拱底,同侧拱腰峰值振速大于拱脚。因此,可知邻洞隧道迎爆侧为爆破影响最大部位,其原因是迎爆侧离爆源最近,爆破地震波携带能量大,隧道振动强度大。而背爆侧离爆源远,既有隧道空间对振动衰减作用较大,地震波能量损耗大,所引起的振动强度相对较小。

## 4 结论

通过对小间距隧道扩挖爆破现场测试试验和数值模拟,重点研究了爆破作用下邻洞隧道振动响应特征及衰减规律。主要研究结论如下:

- (1) 爆破振动强度随爆心距的增加不断降低。爆破掏槽段炸药引起的隧道振动最大,其原因是炸药药量大以及围岩夹制作用大。
- (2) 爆破近区,隧道扩挖爆破对邻洞隧道振动响应影响更大,随爆心距增加其振动衰减也更快。
- (3) 邻洞隧道迎爆侧离爆源近,爆破地震波携带能量大,隧道振动强度大。背爆侧离爆源远,既有隧道空间对振动衰减作用较大,地震波能量损耗大,所引起的振动强度相对较小。

## 参考文献(References)

[1] MASHIMO H, ISHIMURA T. Technological development of section enlargement for existing tunnels[J]. Tun-

- nels and Underground, 2003, 34(9): 729-736.
- [2] TONON F. Methods for enlarging transportation tunnels while keeping tunnels fully operational[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2010(11): 248-271.
- [3] 贾 剑, 石景山, 周顺华, 等. 盾构隧道扩建地铁站地表沉降预测及分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(S1): 2883-2890.
- [3] JIA Jian, SHI Jing-shan, ZHOU Shun-hua, et al. Forecast and analysis of surface settlement of metro station constructed by shield tunnel expanding[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S1): 2883-2890. (in Chinese)
- [4] 傅立磊, 梅志荣. 厦门莲岳双线浅埋隧道扩挖施工技术及其安全性研究[J]. 兰州交通大学学报, 2019, 38(1): 7-12, 18.
- [4] FU Li-lei, MEI Zhi-rong. Study on construction technology and safety of shallow buried tunnel of the Xiamen-Lianyue Double-line[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2019, 38(1): 7-12, 18. (in Chinese)
- [5] 余 顺, 胡学兵, 夏阳于雨. 单洞三车道公路隧道扩挖成四车道的开挖方案的探讨及思考[J]. 公路交通技术, 2019, 35(6): 89-93.
- [5] YU Shun, HU Xue-bing, XIA Yang-yuyu. Discussion and consideration on the excavation scheme of expanding three lanes into four lanes of single highway tunnel [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(6): 89-93. (in Chinese)
- [6] 杨小礼, 王作伟, 陈 杰. 既有隧道扩建工程及衬砌稳定性研究[J]. 交通科学与工程, 2010, 26(1): 49-58.
- [6] YANG Xiao-li, WANG Zuo-wei, CHEN Jie. Extension engineering of tunnel and stability analysis of lining structures[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2010, 26(1): 49-58. (in Chinese)
- [7] 彭泽森, 倪 迪, 陶小钧, 等. 隧道扩挖既有衬砌的爆破拆除[J]. 爆破器材, 2019, 48(6): 48-54.
- [7] PENG Ze-sen, NIDi, TAO Xiao-jun, et al. Blasting Demolition of Existing Lining in Tunnel Expansion Excavation [J]. Explosive Materials, 2019, 48(6): 48-54. (in Chinese)
- [8] 吴 慧, 汪良忠. 复杂环境下既有隧道扩挖爆破技术[J]. 工程爆破, 2019(4): 39-44.
- [8] WU Hui, WANG Yin-zhong. Expansion blasting technique of existing tunnel in complex environment [J]. Engineering Blasting, 2019(4): 39-44. (in Chinese)
- [9] 王 飞, 胡力学, 胡永占. 侯月线桃坪隧道病害成因及改造方案研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(1): 192-199, 204.
- [9] WANG Fei, HU Li-xue, HU Yong-zhan. Study on disease causes and rehabilitation schemes for the Taoping Tunnel on Houma-Yueshan Railway [J]. Modern Tunneling Technology, 2019, 56(1): 192-199, 204. (in Chinese)
- [10] 汪 波, 郭新新, 王志伟, 等. 新建隧道爆破施工对既有裂缝病害隧道的动力响应分析[J]. 爆破, 2019, 36(1): 90-96.
- [10] WANG B, GUO Xin-xin, WANG Zhi-wei, et al. Caused dynamic response of existing tunnel with cracks to blasting excavation of newly-built tunnel [J]. Blasting, 2019, 36(1): 90-96. (in Chinese)
- [11] 倪 迪, 陈 明, 康三月. IV级围岩隧道钻爆法扩挖方案比选[J]. 公路, 2019, 64(12): 298-303.
- [11] NI Di, Chen Ming, KANG San-yue. Comparison and selection of drilling and blasting expansion scheme for grade iv surrounding rock tunnel [J]. Highway, 2019, 64(12): 298-303. (in Chinese)
- [12] 孟凡兵, 林从谋, 郑 强, 等. 四车道扩挖隧道爆破振动对新建隧道的的影响[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2012, 33(1): 79-83.
- [12] MENG Fan-bing, LIN Cong-mou, ZHENG Qiang, et al. Influence of expanded four-lane tunnel blasting vibration on new tunnel [J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2012, 33(1): 79-83. (in Chinese)
- [13] 郑明新, 夏一鸣, 胡国平, 等. 爆破振动对既有高铁隧道衬砌安全的影响分析[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(3): 813-818.
- [13] ZHENG Ming-xin, XIA Yi-ming, HU Guo-ping, et al. Impact analysis of blasting vibration on the safety of existing high speed tunnel lining [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(3): 813-818. (in Chinese)
- [14] 李 凤, 吴 亮, 许 锋, 等. 片岩隧道爆破对本洞和邻洞围岩的扰动分析[J]. 爆破, 2015, 32(3): 123-127, 145.
- [14] LI Feng, WU Liang, XU Feng, et al. Perturbation analysis of hole and adjacent tunnel surrounding rock induced by schist tunnel blasting [J]. Blasting, 2015, 32(3): 123-127, 145. (in Chinese)
- [15] 汪 波, 郭新新, 王志伟, 等. 新建隧道爆破施工对既有空洞病害隧道的动力响应分析[J]. 爆破, 2019, 36(3): 116-123, 146.
- [15] WANG Bo, GUO Xin-xin, WANG Zhi-wei, et al. Caused dynamic response of existing cavity disease tunnel by blasting excavation of newly-built tunnel. [J]. Blasting, 2019, 36(3): 116-123, 146. (in Chinese)
- [16] GB 6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.