

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.03.007

Ⅲ级硬岩隧道全断面光面爆破试验研究*

马乐¹,张万志²,刘成龙¹,李云¹

(1.北京城乡建设集团有限责任公司,北京100067;2.山东交通学院交通土建工程学院,济南250357)

摘要: 光面爆破是硬岩隧道控制开挖的主要方法,由于爆破破岩机理与过程复杂,炮孔与装药参数设计粗放,因此实现隧道全断面光滑轮廓开挖较为困难。以寨山隧道Ⅲ级硬岩段工程为研究背景,首先采用大量的爆破试验和调查研究的方法,发现原爆破方案下,爆后隧道洞周轮廓拱部至边墙存在超挖、欠挖分布,以及存在盲炮、二次爆破施工等问题;其次,依据相关规范和工程经验,提出了光面爆破炮孔与装药参数的优化措施,包括减小周边眼间距、增加内圈眼数量、水袋间隔装药、炮泥堵塞和减小单孔装药量。结果表明:合理设计光爆层炮眼数量、单孔装药量,采用水袋间隔装药与炮泥堵塞,可提高装药爆炸能量的利用率,实现光爆层岩体的均匀破碎,有利于控制洞周岩体超欠挖。采用优化的光面爆破参数,爆后隧道全断面轮廓成形光滑、圆顺,炮孔残痕清晰,有利于提高隧道开挖质量和加快隧道整体施工进度。研究成果可为类似硬岩隧道全断面光面爆破开挖参数设计与优化提供一定的技术与方法借鉴。

关键词: Ⅲ级硬岩;隧道工程;全断面;光面爆破;现场试验

中图分类号: U451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)03-0046-06

Experimental Study on Full Face Smooth Blasting of Tunnel in Class III Hard Rock

MA Le¹, ZHANG Wan-zhi², LIU Cheng-long¹, LI Yun¹

(1. Beijing Urban & Rural Construction Group Co., Ltd., Beijing 100067, China;

2. School of Transportation and Civil Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China)

Abstract: Smooth blasting is the main method for controlling excavations in hard rock tunnels, but due to the complex mechanism and process of rock fragmentation by blasting, as well as the rough design of blast parameters, it is difficult to achieve a smooth excavation profile for the entire tunnel. This study focuses on the Level III hard rock section of the Zhaishan tunnel, and through a large number of blasting tests and investigations, it was found that there were problems such as over-excavation and under-excavation, misfire, and secondary blasting construction around the tunnel profile after the original blasting plan was carried out. Based on relevant specifications and engineering experience, optimization measures were proposed for the blasting parameters, including reducing the spacing between contour holes, increasing the number of relief holes, using water bag as the charge decking and stemming, as well as reducing the amount of explosives loaded in each hole. The results showed that the optimization measures can improve

收稿日期 (Date of reception): 2022-06-19

网络首发日期 (Published online): 2023-02-17

作者简介: 马乐 (1987-), 男, 工程师, 主要从事隧道及地铁工程施工技术创新应用研究, (E-mail) 737465871@qq.com。

通讯作者: 张万志 (1988-), 男, 讲师, 主要从事隧道工程爆破机理及爆破参数优化研究, (E-mail) zzwanzhi@163.com。

基金项目: 山东省自然科学基金 (ZR2021QE246); 山东交通学院基金项目 (50004955)

About the author: MA Le (1987-), male, engineer, mainly engaged in innovative application research of tunnel and subway construction technology, (E-mail) 737465871@qq.com.

Corresponding author: ZHANG Wan-zhi (1988-), male, lecturer, mainly engaged in research on blasting mechanism and optimization of blasting parameters of tunnel engineering, (E-mail) zzwanzhi@163.com.

Funding projects: Shandong Province Natural Science Foundation (ZR2021QE246), Shandong Jiaotong University Foundation (50004955)

the utilization of explosive energy, achieve uniform fragmentation of the rock mass, and control over-excavation and under-excavation of the tunnel perimeter rock mass. The blast parameter optimization also results in smooth and round tunnel profile with clear blast hole marks, which helps to improve the quality of excavation and accelerate the progress of tunnel construction.

Key words: class III hard rock; tunnel engineering; full face; smooth blasting; field test

随着中国交通工程的高质量建设,响应“碳中和”等国家战略,对隧道钻爆开挖技术的要求越来越高^[1,2]。隧道光面爆破发生于掏槽爆破、崩落爆破之后,光爆层爆破质量直接决定隧道轮廓成形质量^[3,4]。在大断面硬岩隧道全断面光面爆破开挖中,控制超欠挖、光滑轮廓成形是最为理想的施工状态,对于减少初支混凝土超耗、加快循环开挖进度至关重要^[5,6]。

光面爆破作为控制隧道光滑轮廓形成的应用最为广泛的技术,许多学者应用工程试验、室内试验、技术创新等开展了大量研究工作。张继春等依托浆水泉特大断面隧道^[7],通过现场光面爆破试验和理论分析,提出了适合于浆水泉隧道Ⅲ、Ⅳ级围岩的光面爆破方案。姜乾星等为了解决大断面隧道大量炮孔钻孔成本高、施工进度慢的难题^[8],提出了将掏槽孔布置位置最大限度“向外推”的减孔布设方法。尹文纲、王海亮等通过现场爆破试验和超欠挖统计分析^[9],提出了周边眼“长、短眼”光面控制爆破技术。王振浩从工程地质条件和钻孔机械特点出发^[10],提出了隧道全断面爆破的炮孔设计与装药控制方法,提高了爆破平整性和施工进度。赵晓明等采用数值仿真的方法^[11],研究了周边孔不连续装药结构、不同药卷间距对围岩爆破效果的作用。研究成果表明运用合理的炮孔及装药参数,可减少围岩超欠挖,保护围岩的稳定性。

为了研究硬岩大断面隧道一次开挖时,轮廓光滑形成的光面爆破技术,本文依托寨山隧道Ⅲ级硬岩段工程,应用现场试验、调查研究和爆破参数优化的方法,提出适用于硬岩隧道全断面光面爆破的周边孔、内圈孔、单孔装药量和装药结构等参数,较好地实现了隧道光滑轮廓开挖,提高了隧道开挖质量。研究成果可为类似硬岩隧道全断面光面爆破开挖提供一定的技术借鉴。

1 工程实例

1.1 工程概况

济南至莱芜高速铁路寨山隧道为单洞双线隧道,隧道设计总长度4812 m。隧道洞身穿越Ⅲ级、Ⅳ级和Ⅴ级围岩,以Ⅲ级围岩为主,长度为2023 m,

占隧道总长的42.4%。Ⅲ级围岩标准断面宽度为14.56 m,高度为12.01 m,断面面积约为144.5 m²,为大断面隧道,隧道全断面轮廓如图1所示。

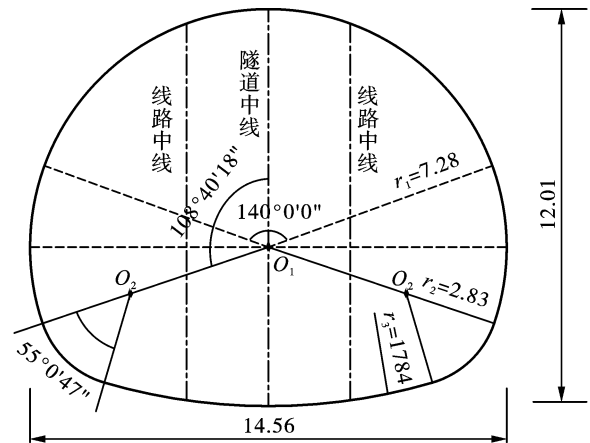


图1 Ⅲ级围岩隧道标准断面(单位:m)

Fig. 1 The standard cross section of tunnel in class III rock mass(unit:m)

1.2 围岩地质条件

隧道Ⅲ级围岩主要岩性为微风化灰岩夹白云岩、白云质灰岩,岩体完整,岩体的单轴饱和抗压强度为45.8~60.4 MPa,属于较硬岩~坚硬岩。

1.3 光面爆破开挖实例

现场隧道爆破试验段里程为DK31+898~DK32+118,采用全断面(未考虑仰拱)光面爆破开挖方法,开挖高度为10.7 m,与仰拱交界宽度为10.3 m,如图2所示。隧道每循环进尺为3.0 m,现场借助五层凿岩台架进行钻孔与装药,钻孔为手持风钻钻孔,孔径42 mm。凿岩台架第一层至第五层的高度依次为2.0 m、2.0 m、1.8 m、1.8 m、1.5 m。

2 光面爆破存在问题分析

2.1 光面爆破方案

试验起始历程段DK31+898~DK31+913,循环掘进开挖5次。由于Ⅲ级围岩段岩体完整性好,支护形式为钢筋网片+喷射混凝土。为了控制光面爆破形成光滑轮廓,周边眼钻孔为沿开挖轮廓线平直钻进,现场连续开挖2个循环后,再进行前一循环初期支护,如图3所示。

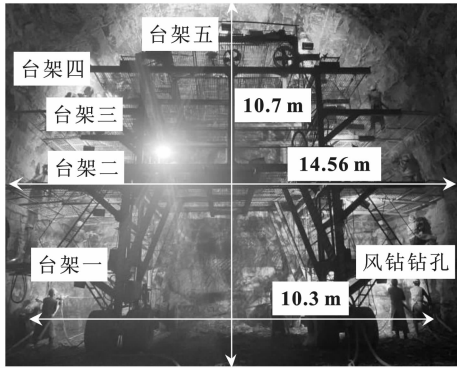
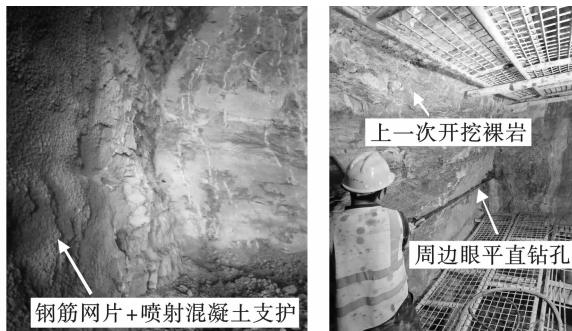


图2 III级围岩隧道全断面钻孔实景
Fig. 2 Full face drilling scene of tunnel in class III rock mass



(a) 前一循环初期支护
(a) Initial support of previous excavation
(b) 连续2次开挖
(b) Two consecutive excavations

图3 III级围岩连续开挖与间隔支护方法
Fig. 3 Full face drilling scene of class III rock mass

2.1.1 炮孔参数

图4为III级围岩隧道全断面的周边眼与内圈眼设计参数。台架一范围内的周边眼间距约为0.6 m,

台架二至拱顶周边眼间距约为0.65 m;台架一至台架五范围内圈眼间距依次为0.85、0.85、0.8、0.9、1.2 m,光爆层厚度(最小抵抗线)依次为0.9、0.95、0.9、0.9、0.7 m。因此,台架一至台架五的周边眼间距与光爆层厚度之比依次为0.67、0.68、0.72、0.72、0.93 m。

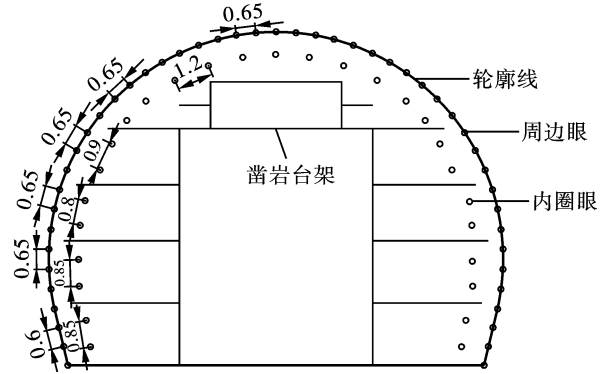


图4 寨山隧道原光面爆破炮孔参数(单位:m)
Fig. 4 The original blast hole parameters of smooth blasting of the Zhaishan tunnel(unit:m)

2.1.2 装药参数

炸药采用2号岩石乳化炸药,药卷直径为32 mm,长度300 mm,单根重量0.3 kg。炸药性能参数详见表1。周边眼与内圈眼装的装药量详见表2。拱底角端周边眼单孔装药量为1.8 kg,为连续装药;其它周边眼单孔装药量为0.9 kg,为孔底至孔口空气间隔装药,导爆索串联起爆;台架一和台架二范围内圈眼单孔装药量为1.5 kg,其它内圈眼单孔装药量为1.2 kg,均为孔底连续装药。

表1 2号岩石乳化炸药性能参数

Table 1 Properties of the No. 2 rock emulsion explosive

密度(g·cm ⁻³)	爆速/(m·s ⁻¹)	猛度/mm	殉爆/cm	作功能力/mL
0.95 ~ 1.30	≥3200	≥3.0	≥3	≥260

表2 隧道炮孔与装药量

Table 2 Tunnel smooth blasting parameters and charge quantities

炮眼类型	孔径/mm	孔数/个	孔长/m	单孔装药量/kg	总装药量/kg	雷管段位
周边眼	42	47	3.0	0.9/1.8	44.1	15/17
内圈眼	42	27	3.0	1.2/1.5	34.8	13

起爆顺序为先内圈眼同时起爆,再周边眼同时起爆,最后拱底角端周边眼单独起爆,起爆间隔50 ms。

2.2 光面爆破的问题与分析

2.2.1 轮廓围岩破坏特征

采用上述光面爆破方案爆破开挖后轮廓围岩成

形不规则,如图5所示。可以看出,轮廓四周围岩炮孔残痕较少,隧道拱顶轮廓为波折形分布,岩块掉落分界面位置存在局部超挖,最大线性超挖约为30 cm;左拱肩、右拱肩及边墙岩体较为完整,局部存在欠挖,左、右拱肩最大线性欠挖分别约为20、15 cm。



图5 光面爆破后轮廓围岩不规则成形

Fig. 5 Irregular contour forming of surrounding rock mass after smooth blasting

2.2.2 爆后存在盲炮

由于周边孔为空气间隔装药,炸药为串联、孔底电子雷管引爆。现场爆破完成后,通过排险后孔底偶尔存在未引爆的滞留的乳化炸药,如图6所示。这种情况施工过程中若受意外撞击,滞留的炸药存在意外引爆的危险。

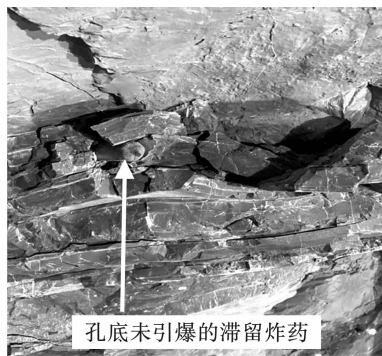


图6 爆破后孔底未起爆的炸药

Fig. 6 Unexploded explosive at hole bottom after blasting

2.2.3 欠挖岩体的二次爆破

针对拱肩至边墙位置存在的欠挖岩体,为了满足隧道设计轮廓成形的要求,现场需要进行二次钻孔、装药与起爆,如图7所示。这一过程既影响施工进度,又存在施工安全隐患。

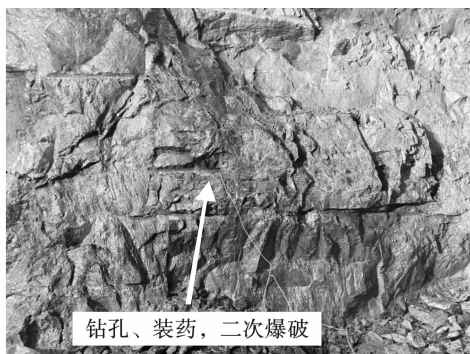


图7 欠挖位置的岩体进行二次爆破

Fig. 7 Secondary blasting of rock mass at underbreak location

3 光面爆破优化及结果分析

光面爆破后造成洞周围岩超欠挖、存在盲炮及

需要二次爆破,必然造成施工进度慢、初支混凝土超耗及存在安全隐患。根据上述光面爆破的问题分析,依据《高速铁路隧道工程施工技术规程:QCR9406—2015》^[12]、《爆破工程》^[13]等技术要求,本文从光面爆破炮孔参数和装药结构调整等方面,提出硬岩隧道全断面光面爆破控制技术。

3.1 炮孔参数优化

文献[12]中规定:硬岩~极硬岩周边眼间距为40~60cm,光爆层厚度为40~60cm,二者的相对距离为0.8~0.85。因此,周边眼间距台阶一范围内调整为50cm,台架二至台架五范围内调整为55cm。光爆层厚度台阶一范围内调整为63cm,台架二至台架五范围内调整为68cm;相对距离控制为0.8。

内圈眼先于周边眼起爆,为了使得内圈眼起爆后形成均匀的光爆层厚度,以致周边眼起爆后形成光滑规则的轮廓线,台架一至台架五内圈眼间距依次调整为0.6、0.62、0.62、0.62、0.85m。

优化后的隧道全断面周边眼与内圈眼参数如图8所示。

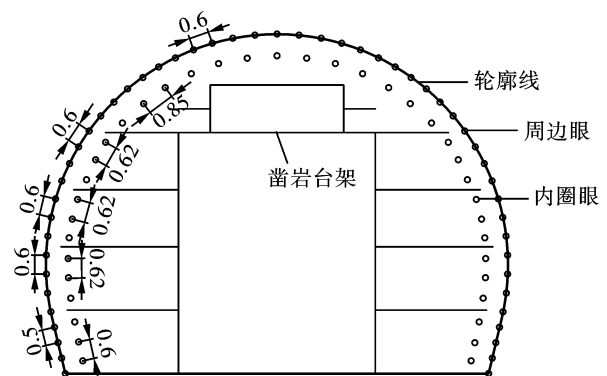


图8 光面爆破优化后的炮孔布置(单位:m)

Fig. 8 Optimized blast hole layout for smooth blasting(unit:m)

3.2 装药量调整

依据文献[12],硬岩~极硬岩周边眼装药集中度0.15~0.40kg/m;依据文献[14],中硬岩~硬岩

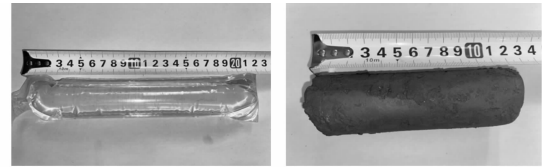
周边眼装药集中度 $0.20 \sim 0.35 \text{ kg/m}$ 。由于试验段隧道属于较硬岩~坚硬岩,因此周边眼装药集中度设定为 $0.20 \sim 0.35 \text{ kg/m}$,具体的:台架一至台架四周边眼单孔装药量为 0.75 和 0.9 kg ,间隔布置,台架五为 0.75 kg 。

参考文献[15],适当减小内圈眼装药量,可减小内圈眼爆破时对光爆层的过度损伤,有利于周边眼爆破时光滑轮廓的形成。本文优化方案内圈眼数量由 27 增加至 37 个,因此适当减小内圈眼装药量,具体为:台架一单孔装药量为 1.2 kg ,台架二至台架五为 0.9 kg 。

炮孔装药参数详见表 3。其中,拱底角端周边眼单孔装药量仍为 1.8 kg 。

参考文献[16],采用水袋间隔装药结构和炮泥

堵塞,有利于提高炸药能量的利用率,较均匀的破碎周围岩体,有助于形成光滑轮廓。为此,试验段采用水袋和炮泥进行周边眼装药结构的优化,同时使用导爆索自孔底至孔口进行炸药的串联,孔底使用雷管引爆,如图 9、图 10 所示。见表 3。



(a) 水袋 (a) Water bag (b) 炮泥 (b) Mud

图 9 装药结构优化所用材料

Fig. 9 Materials used for structural optimization of charge

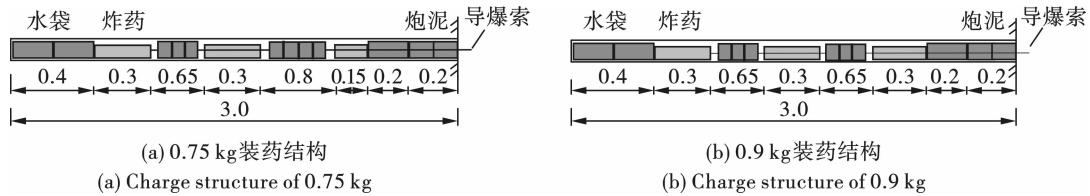


图 10 周边孔装药结构(单位:m)

Fig. 10 Charge structures of peripheral holes(unit:m)

表 3 隧道光面爆破优化后的炮孔与装药量

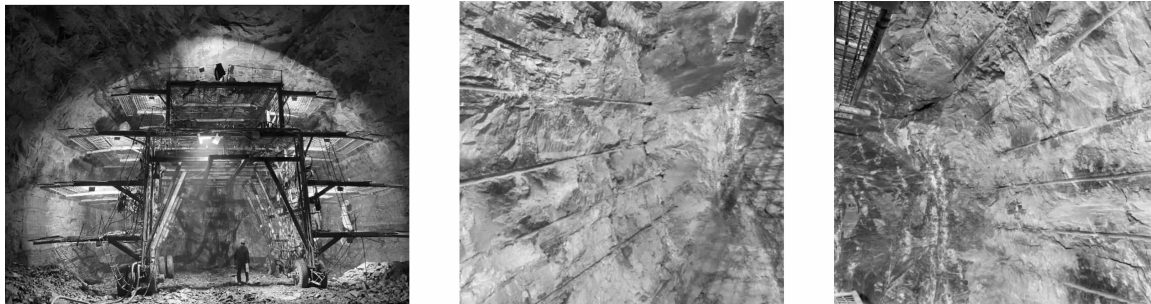
Table 3 The optimized blast hole parameters and charge quantities of tunnel smooth blasting

炮眼类型	孔径/mm	孔数/个	孔长/m	单孔装药量/kg	总装药量/kg	雷管段位
周边眼	42	51	3.0	0.75/0.9/1.8	42.55	15/17
内圈眼	42	37	3.0	0.9/1.2	34.50	13

3.3 爆破质量分析

采用优化的光面爆破方案,爆破开挖后洞周围岩成形规则,超欠挖得到了较好的控制,如图 11 所示。表现为:图 11(a)为全断面洞周开挖围岩成形特征,全断面为光滑轮廓,洞壁上保留有较好的炮孔残痕;图 11(b)、(c)分别为左拱肩至边墙、右拱肩

至边墙的围岩成形特征,可清晰观察到炮孔残痕,统计开挖轮廓面的炮孔残痕率由原来小于 35% 提高到 95% 及以上。优化后,隧道开挖轮廓光滑且成形圆顺。其好处是:围岩超欠挖得到控制,可加快隧道初期支护的质量和进度,同时大大减少初支混凝土的超耗。



(a) 隧道全断面轮廓 (a) Tunnel full section profile

(b) 左拱肩至边墙轮廓 (b) Profile of left spandrel to side wall

(c) 右拱肩至边墙轮廓 (c) Profile of right spandrel to side wall

图 11 隧道光滑轮廓成形

Fig. 11 Smooth contour forming of the tunnel

对比表2和表3中炮孔与装药数据,优化后,周边眼增加4个,内圈眼增加10个,但总装量减少1.85 kg。表明通过优化光面爆破参数和装药结构,可提高炸药爆破能量的利用率。

4 结论

(1) 针对III级硬岩隧道全断面光面爆破开挖时,洞周轮廓常存在超挖、欠挖等不可控难题,应用现场试验、调查研究和爆破参数优化的方法,提出了全断面光面爆破的周边孔、内圈孔、单孔装药量和装药结构等优化参数,通过工程实例应用,实现了隧道光滑轮廓的开挖。

(2) 采用优化的光爆层炮孔与装药参数,隧道洞周围岩炮孔残痕率清晰,超欠挖得到控制,整体轮廓成形圆顺,大大提高了隧道开挖质量和减小初支混凝土的超耗。

(3) 为了消除洞周岩体超欠挖,减小周边眼间距、内圈眼间距、单孔装药量和采用水袋间隔装药、炮泥堵塞等措施,可实现光爆层的均匀爆破与保护洞周岩体的不均匀破碎,有利于提高隧道整体爆破开挖质量和加快施工进度。

参考文献 (References)

- [1] 方俊波,刘洪震,翟进营. 山岭隧道爆破施工技术的发展与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(11): 1980-1991.
- [1] FANG Jun-bo, LIU Hong-zhen, ZHAI Jin-ying. Development and prospect of blasting technology for mountain-crossing tunnels[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1980-1991. (in Chinese)
- [2] 孙苗,李兴明,吴立. 基于EP-CEEMDAN-PED的隧道扩挖爆破网络延时分析[J]. 爆破器材, 2022, 51(4): 51-57.
- [2] SUN Miao, LI Xing-ming, WU Li. Network delay analysis in tunnel expansion blasting based on EP-CEEMDAN-PED[J]. Explosive Materials, 2022, 51(4): 51-57. (in Chinese)
- [3] 马春德,刘泽霖,郑静,等. 预留光爆层爆破技术在长大隧道全断面施工中的应用[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(6): 173-180.
- [3] MA Chun-de, LIU Ze-lin, ZHENG Jing, et al. Application of blasting techniques with the reserved smooth blasting layer in full-face construction of large and long tunnels[J]. Modern Tunneling Technology, 2019, 56(6): 173-180. (in Chinese)
- [4] 阿旺加措,冯佳佳,刘美山,等. 白鹤滩特高拱坝坝肩柱状节理玄武岩开挖爆破试验研究[J]. 爆破, 2022, 39(2): 63-74.
- [4] NGAWANG Gyatso, FENG Jia-jia, LIU Mei-shan, et al. Experimental study on blasting of columnar jointed basalt of Baihetan high arch dam[J]. Blasting, 2022, 39(2): 63-74. (in Chinese)
- [5] 张伟,王少飞,喻佳,等. 无中导洞连拱隧道后行洞爆破方案优化研究-以新民隧道为例[J/OL]. 隧道建设(中英文), 2022: 1-12. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1745.u.20220721.1502.004.html>.
- [5] ZHANG Wei, WANG Shao-fei, YU Jia, et al. Study on optimization of blasting scheme for back tunnel of double arch tunnel without pilot tunnel: take Xinmin tunnel as an example[J]. Tunnel Construction, 2022: 1-12. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1745.u.20220721.1502.004.html>. (in Chinese)
- [6] 康永全,孟海利,郭云龙,等. 隧道周边孔差异化爆破作用机理及试验研究[J]. 铁道建筑, 2022, 62(7): 114-117.
- [6] KANG Yong-quan, MENG Hai-li, GUO Yun-long, et al. Mechanism and experiment research of tunnel peripheral hole differential blasting[J]. Railway Engineering, 2022, 62(7): 114-117. (in Chinese)
- [7] 张继春,潘强,郑爽英,等. 特大断面公路隧道的光面爆破技术研究[J]. 爆破, 2018, 35(4): 52-57.
- [7] ZHANG Ji-chun, PAN Qiang, ZHENG Shuang-ying, et al. Technique of smooth blasting of highway tunnel with super-large section[J]. Blasting, 2018, 35(4): 52-57. (in Chinese)
- [8] 娄乾星,陶铁军,田兴朝,等. 大断面隧道爆破减孔布设方法研究[J]. 工程爆破, 2022, 28(2): 54-61.
- [8] LOU Qian-xing, TAO Tie-jun, TIAN Xing-chao, et al. Research on blast hole reduction method in large-section tunnels[J]. Engineering Blasting, 2022, 28(2): 54-61. (in Chinese)
- [9] 尹文纲,王海亮,胡红星,等. 隧道成型控制爆破技术及围岩损伤范围研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(5): 851-856.
- [9] YIN Wen-gang, WANG Hai-liang, HU Hong-xing, et al. Study of tunnel controlled blasting technology and blast-induced damage zone of surrounding rocks[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(5): 851-856. (in Chinese)
- [10] 王振浩. 黄柏山隧道光面爆破技术[J]. 爆破, 2022, 39(2): 100-106.
- [10] WANG Zhen-hao. Smooth blasting technology of Huangbaishan tunnel[J]. Blasting, 2022, 39(2): 100-106. (in Chinese)

- fractures in rock blasting[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(8): 1153-1163.
- [11] 李启月,黄武林,吴正宇,等. 不同地应力条件下直眼掏槽破岩的理论研究与数值模拟[J]. *中国安全生产科学技术*, 2016, 12(11): 57-62.
- [11] LI Qi-yue, HUANG Wu-lin, WU Zheng-yu, et al. Theoretical research and numerical simulation of rock breaking under different in-situ stress conditions[J]. *China Safety Production Science and Technology*, 2016, 12(11): 57-62. (in Chinese)
- [12] Q Fang, X Z Kong, H Wu, et al. Method for determining parameters of rock Holmquist Johnson cook model[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(3): 197-204.
- [13] 丁黄平. 节理裂隙岩体隧道爆破成型效果研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [13] DING Huang-ping. Study on blasting forming effect of joint fractured rock mass tunnel[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [14] 刘江超,高文学,王林台,等. 水封爆破装药结构优化数值分析及其应用[J]. *振动与冲击*, 2020, 39(9): 57-62, 96.
- [14] LIU Jiang-chao, GAO Wen-xue, WANG Lin-tai, et al. Numerical analysis and application of charge structure optimization of water seal blasting[J]. *Vibration and Impact*, 2020, 39(9): 57-62, 96. (in Chinese)
- [15] 王平. 大断面隧道楔形掏槽爆破参数的优化[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [15] WANG Ping. Optimization of blasting parameters for wedge cut of large section tunnel[D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese)
- [16] 李福强. 空孔楔形掏槽爆破数值模拟研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [16] LI Fu-qiang. Numerical simulation of empty hole wedge cut blasting[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [17] 何琪. 深埋隧洞爆破开挖扰动损伤机理及控制研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [17] HE Qi. Research on the damage mechanism and control of deep tunnel blasting excavation[D]. Wuhan: Wuhan University, 2017. (in Chinese)
- [18] 王卫华,张恒根,李夕兵. 爆破载荷下岩石的拉压损伤模型[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(11): 3918-3929.
- [18] WANG Wei-hua, ZHANG Heng-gen, LI Xi-bing. Tensile and compressive damage model of rock under blasting load[J]. *Journal of Central South University (Natural Science Edition)*, 2021, 52(11): 3918-3929. (in Chinese)
- [19] 陈汉霖. 爆破开挖损伤区对岩质边坡稳定性的影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.
- [19] CHEN Han-lin. Study on the influence of blasting excavation damage zone on the stability of rock slope[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021. (in Chinese)
- [20] 吉凌,周传波,张波,等. 大断面隧道爆破作用下围岩动力响应特性与损伤效应研究[J]. *铁道学报*, 2021, 43(7): 161-168.
- [20] JI Ling, ZHOU Chuan-bo, ZHANG Bo, et al. Study on dynamic response characteristics and damage effect of surrounding rock under blasting of large section tunnel[J]. *Journal of Railway*, 2021, 43(7): 161-168. (in Chinese)

英文编辑:黄刚

(上接第51页)

- [11] 赵晓明,杨玉民,蒋楠,等. 深埋引水隧洞光面爆破周边孔装药结构优化试验研究[J]. *高压物理学报*, 2022, 36(4): 208-218.
- [11] ZHAO Xiao-ming, YANG Yu-min, JIANG Nan, et al. Optimization of charging structure of surrounding holes in smooth blasting of deep diversion tunnel[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(4): 208-218. (in Chinese)
- [12] 中国铁路总公司. Q/CR 9604—2015 高速铁路隧道工程施工技术规程[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
- [13] 中交第一公路工程局有限公司. JTG/T 3660—2020 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020: 45.
- [14] 戴俊. 爆破工程[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2015: 157-185.
- [15] 李启月,魏新傲,郑静,等. IV级围岩大断面隧道全断面开挖轮廓控制研究与应用[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(3): 88-95.
- [15] LI Qi-yue, WEI Xin-ao, ZHENG Jing, et al. Study and application of profile control for full section excavation of large section tunnel in grade IV surrounding rock[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(3): 88-95. (in Chinese)
- [16] 康永全,薛里,孙崔源,等. 间隔不耦合装药结构形式及特点分析[J]. *工程爆破*, 2020, 26(5): 62-67.
- [16] KANG Yong-quan, XUE Li, SUN Cui-yuan, et al. Structural form and characteristic analysis of charge structure with deck decoupling[J]. *Engineering Blasting*, 2020, 26(5): 62-67. (in Chinese)

英文编辑:黄刚