

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2023.02.007

空孔在硬岩光面爆破作用中的试验与应用*

张伟^{1,2}, 褚夫蛟¹, 王银刚², 张兴强²

(1. 山东理工大学 资源与环境工程学院, 淄博 255000; 2. 山东金创股份有限公司, 烟台 265600)

摘要: 光面爆破对巷道稳定性和安全性意义重大。普通光面爆破法应用在小断面硬岩巷道全断面一次爆破上存在一些弊端, 由于周边孔装药量、孔间距及不耦合系数的关系, 爆破后出现超欠挖现象, 成形不规则, 增加了支护工作量, 降低了掘进效率, 片帮与顶板垮塌等问题。为了达到全断面光面爆破一次成巷, 尽量减小爆破对围岩的破坏, 改善巷道成形, 保证巷道安全高效掘进。利用空孔的应力集中效应, 在周边孔设计6个大直径空孔, 空孔直径 $\phi=70$ mm, 周边孔间距由原来的544~600 mm减少到400 mm, 并且均匀布置在巷道轮廓上; 周边孔选择空气间隔装药结构, 间距0.4 m。选取在黑炭沟金矿-500 m中段掘进巷道进行光面爆破试验, 试验结果表明: 在小断面硬岩巷道全断面一次爆破中, 与普通光面爆破法相比, 优化后的光面爆破在技术经济安全方面更加显著。巷道掘进平均循环进尺增加0.03 m, 平均半孔率提高34%, 炸药单耗降低了0.42 kg/m³, 爆破作业成本降低了7.82元/m³。巷道壁完整光滑, 顶板稳定性更好, 能够有效降低对围岩的扰动程度, 为深部硬岩全断面掘进的矿山提供经验。

关键词: 空孔; 硬岩巷道; 光面爆破; 全断面掘进

中图分类号: TD263 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2023)02-0048-05

Experiment and Application of Empty Hole in Smooth Blasting of Hard Rock

ZHANG Wei^{1,2}, CHU Fu-jiao¹, WANG Yin-gang², ZHANG Xing-qiang²

(1. Shandong University of Technology School of Resources and Environmental Engineering,
Zibo 255000, China; 2. Shandong Jinchuang Co., Ltd., Yantai 265600, China)

Abstract: Smooth blasting is of great significance to roadway stability and safety. The conventional smooth blasting method has some disadvantages when applied to the full-section blasting of a small section roadway in hard rock. Due to the selection of unreasonable charge quantity of the contour hole, hole spacing and decoupling coefficient, the phenomenon of backbreak or underbreak occurs after blasting. This approach can also lead to increased support work, decreased efficiency, and problems such as sidewall collapse and roof caving. To achieve a one-time full-section smooth blasting of the tunnel and reduce damage to the surrounding rock, an optimized smooth blasting method was developed. Six large-diameter empty holes with a diameter of 70 mm were designed at the periphery of the tunnel using the stress concentration effect of empty holes. The distance between the contour holes was reduced from 544~600 mm to 400 mm and evenly distributed around the tunnel contour. The contour holes were charged with the air decking structure and spaced at intervals of 0.4 m. The optimized smooth blasting method was applied in a test of a hard rock tunnel in the middle roadway of Heilangou Gold Mine at a depth of 500 m. Results show that compared with the traditional smooth blasting method, the optimized smooth blasting is more remarkable in technical, economic

收稿日期: 2023-01-31

作者简介: 张伟(1989-), 男, 助理工程师、在职硕士, 从事采矿技术与地下工程爆破研究, (E-mail) 780041664@qq.com.

通讯作者: 褚夫蛟(1988-), 男, 讲师、博士, 从事控制爆破研究, (E-mail) zczhfj@sina.com.

基金项目: 国家自然科学基金(51904177)

and safety aspects. The average footage increased by 0.03 m, the average half-hole rate increased by 34%, the explosive consumption decreased by 0.42 kg/m³, and the blasting operation cost decreased by 7.82 yuan/m³. The tunnel walls were smooth, and the roof stability was better, effectively reducing the disturbance to the surrounding rock, providing valuable experience for deep hard rock mining.

Key words: empty hole; hard rock roadway; smooth blasting; full section excavation

20世纪50年代,瑞典率先提出了光面爆破技术,随后美国、加拿大也加入了研究,我国自20世纪70年代开始在矿山、隧道、水利工程等方面开始应用光面爆破技术。很多国内外学者长期致力于光面爆破技术的改进,随着人们对安全生产的重视程度与技术需求,光面爆破技术在深部开采、地应力等不同地质环境条件下得到了很多优化^[1-8]。

Nguyen Ngoc MINH等结合 Delphi 程序语言与 AutoCAD 提出了一种隧道爆破模型^[9],表明炸药单耗随着岩石硬度系数、裂隙间距和炮孔直径的增加而增加,随着断面增大而减小;潘城等采用 Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT) 模型研究了装药结构对岩体爆破损伤的影响^[10],模拟结果表明,偏心爆破具有明显的压力偏心效应,通过进一步优化爆破参数,有效地控制了超欠挖现象。李卓等通过理论计算及 LS-DYNA 数值模拟方法^[11],发现双空孔可为掏槽孔间产生连贯空腔提供良好条件,光爆孔间距为 40 cm 时可达到最佳效果,随着间距增加,两孔间的损伤区由贯通转为不贯通;付佳佳等从理论和数值模拟上解释了空孔具有改善光面爆破效果的作用^[12];满轲等解释了空孔效应破岩机理^[13,14],分析并计算得到周边装药孔与空孔的间距,通过合理的

间距对坚硬岩光面爆破中至关重要。

鉴于此,针对深部硬岩小断面巷道,从大直径空孔与周边孔装药孔相结合进行研究^[15,16]。分析了普通光面爆破法在深部小断面硬岩掘进中存在的不足之处,并将周边孔布置优化,即在周边孔设计若干大直径空孔,同时减小周边孔间距及单孔装药量,选择在山东金创股份有限公司黑岚沟矿区-500 m 中段(距地表 684 m)岩巷展开试验。

1 工程概况

1.1 矿区概况

山东金创股份有限公司黑岚沟金矿位于蓬莱区东南 45 km 处,建矿 30 余年,现生产能力为 20 万吨/年。区内地层出露较简单,构造运动较频繁,构造主要为接触带构造与断裂构造。岩浆活动强烈,岩浆岩十分发育,分布面积较广,约占 70% 以上,主要有中生代燕山早期郭家岭超单元、新元古代震旦期玲珑超单元、古元古代吕梁期双顶超单元、新太古代五台-阜平期栖霞超单元、马连庄超单元以及由上述侵入岩派生的各类脉岩,围岩主要为二长花岗岩,其次为煌斑岩。经测定,二长花岗岩的主要性质如表 1。

表 1 围岩主要物理性质

Table 1 Main physical properties of surrounding rock

岩性	密度/(g·cm ³)	单轴抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	泊松比
二长花岗岩	2.72	146.3	44.1	8.69	0.28

1.2 普通光面爆破技术

以巷道断面为 2.2 m × 2.2 m (断面积为 4.49 m²) 为例,岩石的坚固性系数 $f = 10 \sim 14$, 凿岩设备利用企业现有 YT-28 风动式凿岩机,钎杆长 2.5 m,钻头 $\phi = 40$ mm,采用 2# 岩石乳化炸药和 1 ~ 10 段毫秒延期导爆管雷管,药卷规格: $\phi = 32$ mm, $H = 220$ mm, $G = 0.2$ kg。

掏槽孔:采用桶型掏槽,孔数 7 个,其中 6 个不装药,孔深 2.5 m,装药量 2.0 kg (10 卷);辅助孔:孔数 9 个,孔深 2.4 m,单孔装药量 1.6 kg (8 卷),装药长度 1.76 m,连续不耦合装药;周边孔:孔数 9 个,孔深 2.4 m,帮孔与顶孔单孔装药量 1.0 kg (5 卷),

装药长度 1.10 m;底孔:孔数 4 个,孔深 2.4 m,单孔装药量 1.4 kg (7 卷),装药长度 1.54 m,连续不耦合装药或者间隔不耦合装药,炮泥填塞 300 ~ 400 mm,簇连方式起爆。每循环炸药消耗量 30.2 kg,导爆管消耗 24 发。普通光面爆破炮孔布置图,如图 1 所示。

1.3 普通光面爆破效果

结果表明:平均每循环进尺 2.27 m,平均半孔率 32%,炸药单耗 2.96 kg/m³,导爆管单耗 2.45 发/m³,爆破成本 85.75 元/m³。

存在的问题:由于药卷直径和孔径的关系,不耦合系数较大,周边孔无论采用连续不耦合装药或者

间隔不耦合结构,炸药单耗都较高,局部超挖严重,对孔底围岩的破坏性较大,部分孔口有“挂帘子”现象,半孔率较低,巷道轮廓不光滑,光面爆破效果不理想。对于断面更大的巷道,其爆破要分两次成形,这样会大大降低掘进效率。爆破后如图2所示。

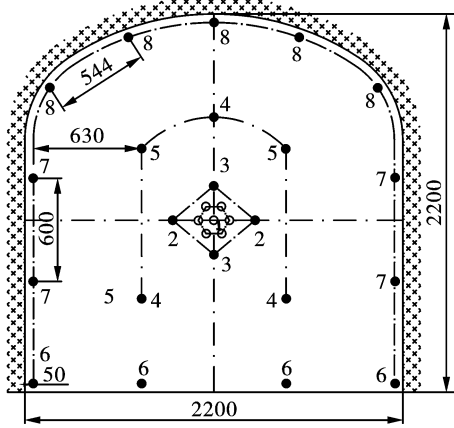


图1 普通光面爆破炮孔布置图(单位:mm)

Fig. 1 Arrangement of conventional smooth blasting holes(unit:mm)

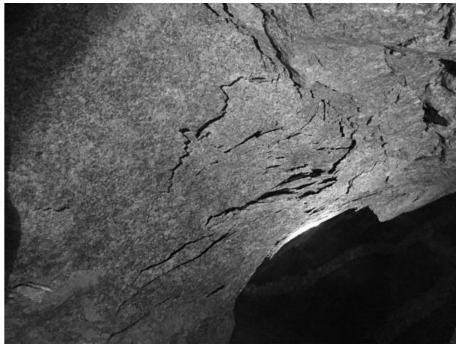


图2 普通光面爆破现场拍摄

Fig. 2 General smooth blasting scene shot

2 周边孔参数优化

2.1 光爆层厚度

光爆层厚度,即炮孔中心到自由面的最小距离,岩石爆破效果与光爆层厚度有关。根据经验公式,光爆层厚度可表示为 $W = (0.6 \sim 0.8) m$,本试验 W 取 $0.63 m$ 。

2.2 周边孔孔距

大量研究表明,空孔具有导向作用,并且空孔附近的应力会明显增大。在周边孔均匀布置6个大直径空孔,直径 $70 mm$,结合经验方法,炮孔间距一般为炮孔直径的 $10 \sim 15$ 倍,选择间距 $0.35 m$ 、 $0.4 m$ 、 $0.45 m$ 和 $0.5 m$ 四组数据进行试验,进而选出合适的炮孔间距。

2.3 炮孔装药量

周边孔单孔装药量 Q

$$Q = \frac{\alpha LG}{H} \quad (1)$$

式中: α 为平均装药系数,取 0.3 ; L 为炮孔平均深度, $2.4 m$; G 为每卷炸药重量, $0.2 kg$; H 为每卷炸药长度, $0.22 m$ 。经计算得出,周边孔单孔装药量 $Q = 0.65 kg$ 。实际施工取 $0.6 kg$ 。

2.4 炮孔数目

周边孔炮孔数目 N_1 [17]

$$N_1 = \frac{B_L - B}{\alpha} + 1 \quad (2)$$

式中: B 为巷道掘进宽度,取 $2.2 m$; α 为周边孔的平均间距,取 $0.4 m$; B_L 为巷道开挖断面周长,取 $8.05 m$ 。计算得 $N_1 = 15.6$,结合施工经验,实际 N_1 取 13 。

3 爆破试验

巷道规格 $2.2 m \times 2.2 m$ (断面面积为 $4.49 m^2$),一次全断面光面爆破施工,根据围岩工程地质与环境地质条件,炸药、雷管、凿岩设备以及炮孔深度、孔径与上述相同。

3.1 孔网参数

根据以往爆破施工经验,掏槽孔、辅助孔和底孔的孔网参数与普通光面爆破参数保持一致。

掏槽孔:对于坚硬岩巷道爆破选择七孔桶型掏槽,孔数 7 个,其中 6 个为空孔,孔间距 $90 mm$,孔深 $2.5 m$,孔径 $\phi = 42 mm$,装药量 $2.0 kg$ (10 卷),装药长度 $2.2 m$,连续不耦合装药,孔口封泥 $300 mm$,采用 1 段导爆管,起爆顺序为 I ,炮孔编号为 $1\#$ 。

辅助孔:孔数 9 个,孔深 $2.4 m$,孔径 $\phi = 42 mm$,每孔装药量 $1.6 kg$ (8 卷),装药长度 $1.76 m$,连续不耦合装药,孔口封泥 $400 mm$,采用 2 段 ~ 5 段导爆管,起爆顺序为 $II \sim V$,编号为 $2\# \sim 5\#$ 。

底孔:孔数 4 个,孔深 $2.4 m$,孔径 $\phi = 42 mm$,每孔装药量 $1.4 kg$ (7 卷),装药长度 $1.54 m$,连续不耦合装药,孔口封泥 $400 mm$,采用 6 段导爆管,起爆顺序为 VI ,编号为 $6\#$ 。

周边装药孔:编号为 $7\# \sim 8\#$,孔数 7 个,孔深 $2.4 m$,孔径 $\phi = 42 mm$ 。 $7\# \sim 8\#$ 孔装药量 $0.6 kg$ (3 卷),装药长度 $0.66 m$,光爆层厚度 $630 mm$,周边孔孔距 $400 mm$ 。间隔不耦合装药,空气间隔 $0.5 m$,孔口封泥 $400 mm$,簇连方式连接,采用 7 段 ~ 8 段导爆管,起爆顺序为 $VII \sim VIII$ 。装药结构如图3所示。

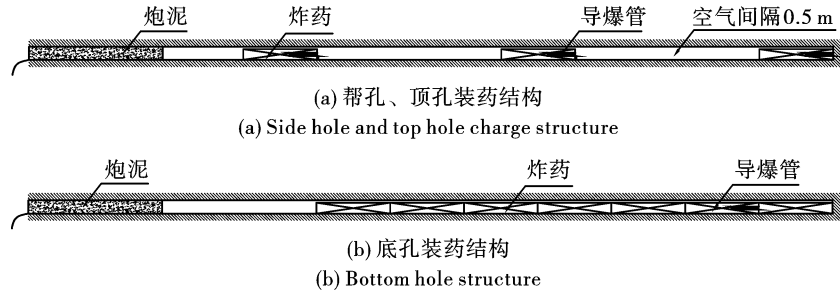


图3 周边空孔装药结构图

Fig. 3 The Structure Diagram of the perimeter hole charge

周边空孔:编号为1'~3',孔数6个,孔深2.4 m,孔径 $\phi = 70$ mm。在7#、8#装药孔连线中心处分别布置1、2和3空孔。炮孔布置图如图4所示。

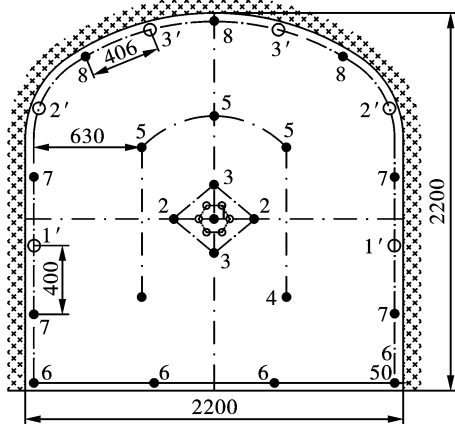


图4 周边空孔光面爆破炮孔布置图(单位:mm)

Fig. 4 Layout of hole in smooth blasting (unit:mm)

进尺增加1.3%,平均半孔率提高34%,炸药消耗量减少13.2%,尽管导爆管单耗增加11发,但是平均爆破作业成本降低9.2%(炸药单价26.25元/kg,导爆管3.25元/发)。主要技术经济指标对比见表2。

采用优化后的爆破参数,周边空孔光面爆破有效提高了半孔率、掘进进尺,降低了炸药、爆破成本,改善了巷道成形,降低了爆破对围岩的扰动,试验达到预期目的。现场爆破如图5。



图5 周边空孔光面爆破后现场拍摄

Fig. 5 Field shot after smooth blasting of perimeter hole

3.2 试验结果分析

相比普通光面爆破,优化后的光面爆破平均循环

表2 主要技术经济指标对比

Table 2 Comparison of main technical and economic indicators

序号	指标	单位	普通光面爆破	空孔光面爆破	优化值
1	炮孔总数	个	29.00	33.00	4.00
2	装药孔数	个	23.00	21.00	-2.00
3	炸药	kg	30.20	26.20	-4.00
4	导爆管	个	25.00	36.00	11.00
5	平均循环进尺	m	2.27	2.30	0.03
6	平均半孔率	%	32.00	66.00	34.00
7	平均炸药单耗	kg/m ³	2.96	2.54	-0.42
8	平均导爆管单耗	个/m ³	2.45	3.49	1.04
9	平均爆破成本	元/m ³	85.75	77.93	-7.82

4 结论

(1)应用普通光面爆破技术发现,由于周边孔装药量与孔间距的关系,周边孔装药过多或者减小

炮孔间距,爆破后巷道超挖严重,成形不理想;周边孔装药量过少或者增大炮孔间距,爆破后造成工程欠挖,局部“挂帘子”,爆下岩石块度大。对于地应力较大的工程,超挖会占到40%以上,爆破24 h后,

两帮及顶板的岩石呈现片状脱落;对于岩石节理裂隙较发育的工程,局部欠挖,甚至需要二次补炮,降低掘进效率。

(2)优化后的光面爆破法在技术经济方面更具有优势。在空孔提供自由面的前提下,裂缝沿着相邻炮孔中心连线处拉伸破坏,由于岩石的抗拉强度远远小于其抗压强度,这样更有利于岩石被切下来,形成更光滑的断面。在安全与经济方面,不但可以降低炸药单耗、爆破成本,而且巷道稳定性更好,尽可能降低炸药对围岩的破坏,为深部硬岩巷道全断面爆破提供经验。

(3)通过试验得知,对脆性较小或韧性较大的岩石,如煌斑岩,其周边孔间距可适当减小或者增大周边空孔孔径,其爆破效果更好。同时为获得较高的炮孔利用率和给光爆层爆破创造良好的自由面,掌握好掏槽孔和辅助孔的位置,掏槽孔要布置在岩石软弱部位。起爆药装入孔底,聚能穴朝向孔口,可以有效提高爆破效果。

参考文献 (References)

- [1] LI Xiao-han, ZHU Zhe-ming, WANG Meng, et al. Numerical study on the behavior of blasting in deep rock masses [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 113: 103968.
- [2] 马元磊, 贺 鹏. 光面爆破技术在过断层巷道掘进的研究与应用[J]. *爆破*, 2020, 37(4): 59-62, 165.
- [2] MA Yuan-lei, HE Peng. Research and application of smooth blasting technology in driving through fault tunnel [J]. *Blasting*, 2020, 37(4): 59-62, 165. (in Chinese)
- [3] 王怀勇, 裴 斌, 王 顺, 等. 光面爆破在节理裂隙发育巷道掘进中的试验研究[J]. *中国矿业*, 2019, 28(2): 373-376.
- [3] WANG Huai-yong, PEI Bin, WANG Shun, et al. Experimental study on smooth blasting in driving tunnel with developed joint and fissure [J]. *China Mining*, 2019, 28(2): 373-376. (in Chinese)
- [4] XU Jin-hui, KANG Yong, WANG Xiao-chuan, et al. Dynamic characteristics and safety criterion of deep rock mine opening under blast loading [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2019, 119: 156-167.
- [5] 王振浩. 黄柏山隧道光面爆破技术[J]. *爆破*, 2022, 39(2): 100-106.
- [5] WANG Zhen-hao. Smooth blasting technology of Huangbaishan Tunnel [J]. *Blasting*, 2022, 39(2): 100-106. (in Chinese)
- [6] 刘国强, 刘 彬, 张庆明, 等. 岩溶隧道光面爆破参数优化及其应用研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2021, 41(S2): 50-57.
- [6] LIU Guo-qiang, LIU Bin, ZHANG Qing-ming, et al. Optimization of smooth blasting parameters for karst tunnel and its application [J]. *Tunnel Construction*, 2021, 41(S2): 50-57. (in Chinese)
- [7] 宋鹏伟, 杨新安, 李 淮, 等. 基于聚能水压光爆技术的周边眼装药结构优化研究[J]. *隧道建设(中英文)*, 2022, 42(1): 103-111.
- [7] SONG Peng-wei, YANG Xin-an, LI Huai, et al. Study on structure optimization of peripheral eye charge based on shaped charge water pressure smooth blasting technology [J]. *Tunnel Construction*, 2022, 42(1): 103-111. (in Chinese)
- [8] 刘敦文, 江树林, 唐 宇, 等. 穿越脉状破碎断层隧道光面爆破技术研究[J]. *工程爆破*, 2021, 27(2): 79-84.
- [8] LIU Dun-wen, JIANG Shu-lin, TANG Yu, et al. Study on smooth blasting technology for tunnel crossing pulse fracture fault [J]. *Engineering Blasting*, 2021, 27(2): 79-84. (in Chinese)
- [9] NGUYEN Ngoc MINH, CAO Ping, LIU Zhi-zhen. Contour blasting parameters by using a tunnel blast design mode [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2021, 28: 100-111.
- [10] PAN Cheng, XIE Li-xiang, LI Xing, et al. Numerical investigation of effect of eccentric decoupled charge structure on blasting-induced rock damage [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2022, 29: 663-679.
- [11] 李 卓, 刘浩杉, 黄永辉, 等. 基于岩石爆破损伤的合理炮孔参数研究[J]. *有色金属工程*, 2022, 12(4): 100-107.
- [11] LI Zhuo, LIU Hao-shan, HUANG Yong-hui, et al. Study on reasonable blasting hole parameters based on rock blasting damage [J]. *Nonferrous Metal Engineering*, 2022, 12(4): 100-107. (in Chinese)
- [12] 付佳佳, 陈必港, 尤 涛, 等. “空孔效应”对光面爆破效果的影响分析[J]. *有色金属*, 2017, 69(1): 44-49.
- [12] FU Jia-jia, CHEN Bi-gang, YOU Tao, et al. Analysis of influence of “Hole effect” on smooth blasting effect [J]. *Non-ferrous Metal*, 2017, 69(1): 44-49. (in Chinese)
- [13] 满 轲, 刘晓丽. 周边空孔效应对爆破振速及围岩损伤的影响研究[J]. *工程力学*, 2020, 37(11): 127-133.
- [13] MAN Ke, LIU Xiao-li. Study on influence of hole effect on blasting vibration velocity and surrounding rock damage [J]. *Engineering Mechanics*, 2020, 37(11): 127-133. (in Chinese)

418发,岩石乳化炸药 1099.1 kg,与采取 42 mm 的小孔径炮孔相比较,节省雷管数量 50%,网路连接简单,准爆率 100%。

参考文献 (References)

- [1] 程康,孙亚飞,李潮雄,等. 复杂环境下钢筋混凝土双曲拱桥爆破拆除[J]. 爆破,2008,25(3):71-73.
- [1] CHENG Kang, SUN Ya-fei, LI Chao-xiong, et al. Blasting and demolition of reinforced concrete hyperbolic arch bridge under complex environment [J]. *Blasting*, 2008, 25(3):71-73. (in Chinese)
- [2] 雷振,李彬,池恩安. 钢筋混凝土双曲拱大桥深孔爆破拆除技术[J]. 爆破,2008,25(3):74-77.
- [2] LEI Zhen, LI Bin, CHI En-an. Reinforced concrete hyperbolic arch bridge deep hole blasting and demolition technology [J]. *Blasting*, 2008, 25(3):74-77. (in Chinese)
- [3] 曹跃,庞端根,杨昌生,等. 大型石拱桥坍塌爆破拆除[J]. 爆破,2005,22(3):61-65.
- [3] CAO Yue, PANG Duan-gen, YANG Chang-sheng, et al. Large stone arch bridge collapse and demolition and demolition [J]. *Blasting*, 2005, 22(3):61-65. (in Chinese)
- [4] 谭雪刚,贺五一,杨智旭,等. 大直径浅孔爆破技术在高架桥拆除中的应用[J]. 爆破,2014,31(1):96-99.
- [4] TAN Xue-gang, HE Wu-yi, YANG Zhi-xu, et al. Application of large-diameter shallow hole blasting technology in viaduct demolition [J]. *Blasting*, 2014, 31(1):96-99. (in Chinese)
- [5] 王守伟,唐加明. 大直径中深孔在桥梁爆破中的应用探讨[J]. 爆破,2011,28(1):89-91.
- [5] WANG Shou-wei, TANG Jia-ming. Discussion on the application of large diameter medium and deep holes in bridge blasting [J]. *Blasting*, 2011, 28(1):89-91. (in Chinese)
- [6] 谭雪刚,年鑫哲,贺五一,等. 大孔径装药技术在高层建筑爆破中的应用探讨[J]. 爆破,2011,27(3):51-53.
- [6] TAN Xue-gang, NIAN Xin-zhe, HE Wu-yi, et al. Discussion on the application of large aperture charging technology in blasting of high-rise buildings [J]. *Blasting*, 2011, 27(3):51-53. (in Chinese)
- [7] 司士营. 大孔径爆破拆除复杂结构石灰窑应用实践[J]. 爆破,2012,28(1):48-51.
- [7] SI Shi-ying. Application practice of large-bore blasting and demolition of lime kilns with complex structure [J]. *Blasting*, 2012, 28(1):48-51. (in Chinese)
- [8] 王姚姚,汪海波,程兵. 巷道掘进药卷与钻孔直径匹配关系对爆破破裂范围的影响[J]. 爆破,2022,39(12):107-111.
- [8] WANG Yao-yao, WANG Hai-bo, CHENG Bing. Effect of the matching relationship between roadway boring rolls and borehole diameter on blasting fracture range [J]. *Blasting*, 2022, 39(12):107-111. (in Chinese)
- [9] 李芳涛,胡志平,陈南南. 爆破荷载作用下隧道围岩裂隙范围计算方法研究[J]. 振动与冲击,2022,41(8):260-269.
- [9] LI Fang-tao, HU Zhi-ping, CHEN Nan-nan. Study on calculation method of fracture range of tunnel surrounding rock under blasting load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(8):260-269. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第52页)

- [14] 满轲,刘晓丽,王锡勇,等. 周边孔炮眼间距对光面爆破效果的影响[J]. 科学技术与工程,2016,16(29):47-51.
- [14] MAN Ke, LIU Xiao-li, WANG Xi-yong, et al. Influence of hole spacing of peripheral holes on smooth blasting effect [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(29):47-51. (in Chinese)
- [15] LI Meng, ZHU Zhe-ming, LIU Rui-feng, et al. Study of the effect of empty holes on propagating cracks under blasting loads [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 103:186-194.
- [16] LI Xin-pin, HUANG Jun-hong, LUO Yi, et al. A study of smooth wall blasting fracture mechanisms using the Timing Sequence Control Method [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2017, 92:1-8.
- [17] 刘俊轩,栾龙发,张智宇,等. 全断面光面爆破技术在坚硬岩巷掘进中的应用[J]. 爆破,2014,31(3):80-84.
- [17] LIU Jun-xuan, LUAN Long-fa, ZHANG Zhi-yu, et al. Application of full-face smooth blasting technology in hard rock tunnel driving [J]. *Blasting*, 2014, 31(3):80-84. (in Chinese)

英文编辑:陈东方