

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.01.012

粉砂质页岩隧道周边孔装药结构及 装药量对爆破效果影响研究

张建国, 杨文, 拜晓亮, 赵海钦, 蒋欢, 李家宏, 段聪, 刘振江, 王红云

(中交二公局隧道工程公司, 西安 710000)

摘要: 光面爆破技术是目前控制隧道超欠挖的主要手段,为进一步探究周边孔装药结构及装药量对爆破效果的影响。以武隆隧道粉砂质页岩段为研究对象,采用现场爆破试验方法,分别进行了周边孔不同装药结构下不同单孔装药量爆破试验。结果表明:周边孔采用导爆索空气间隔装药结构,装药量为 $0.1 + 0.075 \times 5$ kg时爆破效果最佳,周边孔残留率96%,平均线性超挖为15.3 cm。采用雷管空气间隔装药结构,装药量为0.45 kg时爆破效果最佳,周边孔残留率可达90%,平均线性超挖18.4 cm。采用连续装药结构进行爆破,装药量为0.3/0.45 kg时爆破效果最佳,周边孔残留率32%,平均线性超挖量为24 cm。周边孔采用间隔装药结构可以有效提高爆破效果,保证周边孔炮孔残留率在50%以上,减小隧道超挖量;采用导爆索间隔装药爆破效果最佳,周边孔炮孔残留率在90%以上,雷管间隔装药结构爆破效果次之,炮孔残留率在70%以上,连续装药结构爆破效果最差,炮孔残留率50%以下。同时,通过现场试验证明:除采用导爆索空气间隔装药结构外,周边孔也可采用雷管空气间隔装药结构控制隧道超挖。

关键词: 山岭隧道; 粉砂质页岩; 装药结构; 装药量; 爆破效果

中图分类号: TB41 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)01-0085-07

Influence of Charge Structure of Peripheral Hole on Blasting Effect of Silty Shale Tunnel

ZHANG Jian-guo, YANG Wen, BAI Xiao-liang, ZHAO Hai-qin, JIANG Huan,
LI Jia-hong, DUAN Cong, LIU Zhen-jiang, WANG Hong-yun

(China Communications Second Highway Engineering Bureau Co., LTD.,
Tunnel Engineering Co., Xi'an 710000, China)

Abstract: The smooth blasting technology is the main means to control the over excavation and under excavation of tunnels at present. In order to explore the influence of the charge structure and charge amount of peripheral holes on the blasting effect, a series of single hole blasting tests were conducted in the silty shale section of Wulong Tunnel. The results show that the best blasting effect for detonating cord initiation can be achieved when a decked peripheral hole is charged with $0.1 + 0.075 \times 5$ kg of explosive. At this time, the residual rate of peripheral holes is 96%, and the average linear overbreak is 15.3 cm. On the other hand, the best blasting effect for detonator initiation happens when the charge amount of a peripheral hole is 0.45 kg, with the residual rate of peripheral holes as 90% and the average linear overbreak as 18.4 cm. When a continuous charging structure is adopted for the peripheral holes, the best blasting effect appears as the charging amount is 0.3/0.45 kg. In this case, the residual rate of surrounding holes is 32% and the average linear over excavation amount is 24 cm. The decking charge structure of the

收稿日期 (Date of reception): 2022-07-08

网络首发日期 (Published online): 2023-04-15

作者简介: 张建国 (1968-), 男, 学士, 教授级高级工程师, 从事隧道爆破施工方面的研究, (E-mail) 2760683453@qq.com。

About the author: ZHANG Jian-guo (1968-), male, bachelor, professor-level senior engineer, engaged in research on tunnel blasting construction, (E-mail) 2760683453@qq.com.

peripheral holes can effectively improve the blasting effect, which ensures the residual rate of peripheral holes is more than 50% and reduces the tunnel over-excavation. By comparison, the blasting effect, in the order from best to worst, is ranked as detonating cord with decking, detonator with decking and continuous charge, respectively. And their residual rates of peripheral holes are more than 90%, more than 70%, and less than 50%, respectively. It is proved that both the detonating cord with decking charge structure and the detonator with decking charge structure can be used for surrounding holes to control tunnel over-excavation.

Key words: mountain tunnel; silty shale; charge structure; charge quantity; blasting effect

光面爆破是一种能按照设计开挖轮廓线爆破岩体,使巷道周壁或开挖面平整,并使围岩不受明显破坏的控制爆破技术^[1]。周边孔爆破时,在两相邻炮孔连心线上形成贯穿裂缝,产生平整断裂面,能较好的控制超挖情况。同时,周边孔不耦合装药能降低爆炸冲击波的峰值压力^[2]。

目前在隧道光面爆破开挖施工中,大量应用周边孔空气间隔装药结构,它能够保证开挖轮廓面光滑平整,减小围岩损伤,保持围岩完整性和承载力^[3]。秦桂芳等利用有限元软件开展了径向不耦合装药系数及周边孔间距计算^[4],优化得到了合适的爆破参数,通过现场试验取得了较好的爆破效果。宋鹏伟等基于聚能水压爆破机制^[5],采用数值模拟和现场试验,分别对聚能水压光爆的围岩动力响应特性及光爆效果进行对比研究,优化周边孔装药结构。通过数值模拟和现场试验最终确定最优装药结构。赵晓明等针对现场施工方案超挖现象^[6],采用 ANSYS/LS-DYNA 建立周边孔间隔装药结构数值计算模型,分析了不同药卷间距下周边孔模型的爆破效果,最终选择最优周边孔装药结构进行现场试验,取得较好爆破效果。谢烽等在炸药单耗相同的条件下对三种不同炮孔直径的合理空气间隔长度进行研究^[7],得到合理空气柱长度。张迅采用固、水、气三相不耦合装药结构^[8],通过现场试验确定了最佳不耦合系数范围。王圣涛等通过开展多次现场空气间隔装药结构试验^[9],提出合理爆破方案。罗志光等采用水袋、气体和乳化炸药三项材料组合的装药结构进行爆破试验^[10],取得了较好的爆破效果。Fourney W L 通过实验、理论两种方法进行了空气间隔爆破技术的研究及应用^[11]。上述研究主要是通过数值模拟对周边孔装药结构对爆破效果进行研究,通过改变空气柱长度和单一改变装药结构来提高爆破效果。对于现场试验不同装药结构和不同装药结构下装药量对爆破效果的影响研究较少。因此,结合具体围岩条件拟定合适的周边孔装药结构和装药量,并根据爆破效果对其动态优化调整,不断提高光面爆破开挖质量,对指导钻爆法施工具有重

要的现实意义。

以渝湘项目武隆隧道光面爆破施工为依托,在保持周边孔间距、孔深、外插角度等爆破参数不变的情况下,依次开展连续装药、间隔装药不同装药结构下的装药量试验,并对不同的装药结构和装药量爆破效果进行对比,得出最佳装药结构和装药量。

1 工程地质概况

渝湘复线巴彭路项目武隆隧道位于重庆市武隆区境内,隧址区属构造溶蚀、剥蚀中山地貌区。武隆隧道为双向六车道分离式隧道,隧道全长 6615 m,隧道净空 14.00 × 5.0 m²,最大埋深为 738 m。

武隆隧道进口主要为粉砂质页岩,围岩等级为 IV 级,饱和极限抗压强度 $R_c = 15.4$ MPa,属软岩。试验段 IV 级围岩物理力学参数见表 1。

表 1 武隆隧道 IV 级围岩物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of Class IV surrounding rocks of Wulong Tunnel

| 围岩名称 | 重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$) | 饱和抗压 强度/MPa | 内摩擦角 $\varphi/^\circ$ | 粘聚力 c/kPa |
|-------|--|----------------|--------------------------|-----------------------|
| 粉砂质页岩 | 26.80 | 15.40 | 37.91 | 848 |

2 钻爆参数设计

2.1 掏槽孔、掘进孔爆破参数

武隆隧道试验段采用上、下两台阶开挖工法,三臂凿岩台车机械钻孔,上台阶开挖断面面积为 93 m²。

在施工现场技术调查的基础上,结合超前地质预报及隧道地质围岩勘探,采用工程类比法和现场爆破实验确定武隆隧道上台阶钻爆法光面爆破开挖方案,具体见图 1、图 2、图 3 和表 2。

2.2 周边孔爆破参数

(1) 周边孔间距 (E): 结合武隆隧道试验段具体围岩条件周边孔间距取 $E = 50\text{cm}$ 。

(2) 周边孔密集系数 ($m = E/W$): 周边孔密集系数过大会导致欠挖,过小会产生超挖,密集度系数过大或过小均会影响光面爆破效果。一般密集系数在 0.5 ~ 0.8 之间,试验取 $m = 0.8$ 。

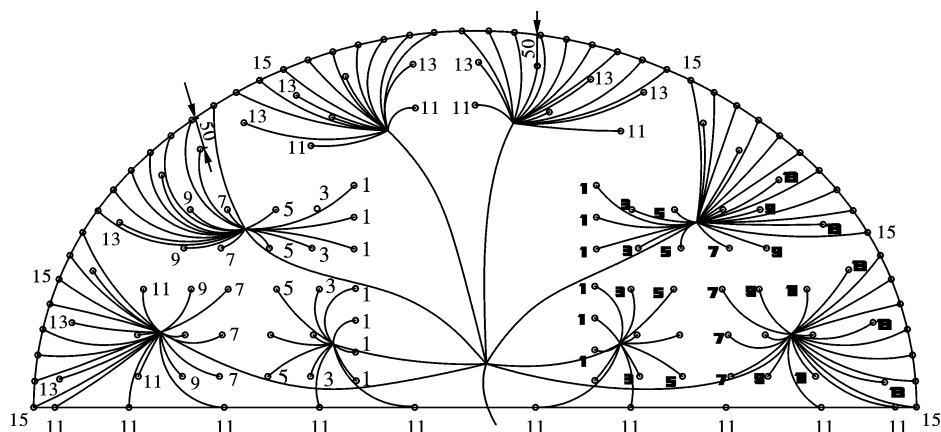


图3 上台阶钻爆法起爆网路图

Fig. 3 Network diagram of bench drilling and blasting initiation

表3 周边孔钻爆参数

Table 3 Blast parameters for peripheral holes

| 围岩级别 | E/cm | W/cm | m | K |
|------|--------|--------|-----|------|
| IV | 50 | 63 | 0.8 | 1.56 |

3 周边孔装药结构及装药量试验

光面爆破的效果受周边孔爆破参数的影响较大,包括周边孔装药集中度、装药结构、间距、密集度系数等。

取得光面爆破效果的关键在于周边孔炸药能量均匀分布,连续装药因炸药能量集中容易造成爆点围岩的过度破坏,间隔装药能够避免炸药能量集中引起的围岩损伤。装药量大小直接影响围岩爆破开挖成效,药量过大爆破围岩抛掷较远、爆破振动较大,药量过小不能完全爆破围岩容易导致局部欠挖,需要二次补炮处理,影响爆破作业施工效率。武隆隧道通过爆破试验循环,开展周边孔不同装药结构以及不同装药量的爆破试验,采用三维激光扫描仪实测围岩超欠挖情况,分析装药结构、装药量对爆破效果的影响。

3.1 导爆索间隔装药

周边孔采用导爆索空气间隔不耦合装药结构,试验过程中使用外径 $\phi=32\text{ mm}$,长度为3 m的PVC管间隔固定分节药卷。装药时提前在PVC管上按50 cm距离等间距切出装药卡槽,先将导爆索通长穿入PVC管中并插入孔底药卷连接,然后将切割分节的药卷压入卡槽与导爆索密接,最后整体装入周边孔内。装药完成后对周边孔进行堵孔,提高爆破效果,同时防止导爆索受先爆冲击波影响被“拉出”炮孔无法引爆炸药。炮孔堵塞后采用“T”型结连接孔外导爆索,结点连接紧实并置于周边孔孔口位置,确

保每个炮孔可靠起爆。装药结构示意图4、图5。

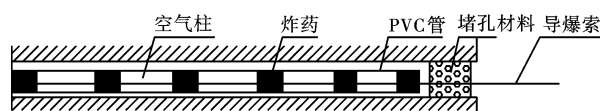


图4 周边孔装药示意图

Fig. 4 Charging of peripheral holes

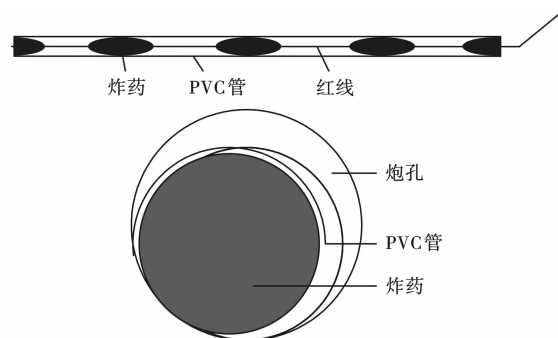


图5 PVC管卡固药卷示意图

Fig. 5 Schematic diagram of PVC pipe

周边孔导爆索空气间隔装药结构条件下,开展不同装药量的5个爆破循环试验,每个爆破循环周边孔间距保持50 cm,光爆层厚度63 cm,炮孔深度保持4。周边孔不同循环爆破参数见表4。

表4 周边孔爆破循环参数表

Table 4 Peripheral hole blasting cycle parameters table

| 试验循环 | 周边眼单孔装药量/kg | 装药集中度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$) |
|------|------------------------|---|
| 1 | 0.05×6 | 0.0750 |
| 2 | $0.1 + 0.075 \times 5$ | 0.1200 |
| 3 | 0.1×6 | 0.1500 |
| 4 | $0.15 + 0.1 \times 5$ | 0.1625 |
| 5 | $0.2 + 0.1 \times 5$ | 0.1750 |

注:每根炸药质量为300 g,长度为30 cm,根据不同的周边孔装药量需要将炸药切割成1/2节、2/3节以及1/3节等不同长度。

各爆破循环试验现场爆破效果及三维激光扫描图, 见图 6。

导爆索空气间隔装药结构下不同装药量的爆破效果见表 5。

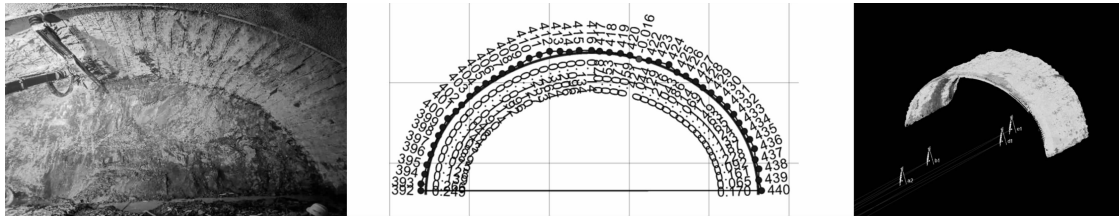


图 6 试验循环爆破效果
Fig. 6 Test blasting effect

表 5 爆破效果统计表

Table 5 Statistics of blasting effect

| 试验循环 | 炮孔残留率/% | 炮孔利用率/% | 平均线性超(+)欠(-)挖/cm |
|------|---------|---------|------------------|
| 1 | 90 | 85 | -5.0 |
| 2 | 96 | 90 | +15.3 |
| 3 | 95 | 85 | +16.6 |
| 4 | 93 | 93 | +18.9 |
| 5 | 90 | 95 | +19.8 |

现场试验表明: 周边孔采用导爆索间隔装药时, 炮孔残留率都在 90% 以上, 炮孔利用率都在 85% 以上, 开挖后平均线性超挖都在 20 cm 以下。试验循环 1 中周边孔装药集中度最小, 爆破后掌子面出现局部欠挖, 最大欠挖 48.4 cm, 炮孔利用率也不高。

通过对比分析, 当周边孔装药集中度在 0.12 kg/m 时, 爆破效果最佳, 爆破后既能够保证炮孔残留率和炮孔利用率, 又能够较好控制隧道超挖。

3.2 连续装药

周边孔连续装药结构见图 7。

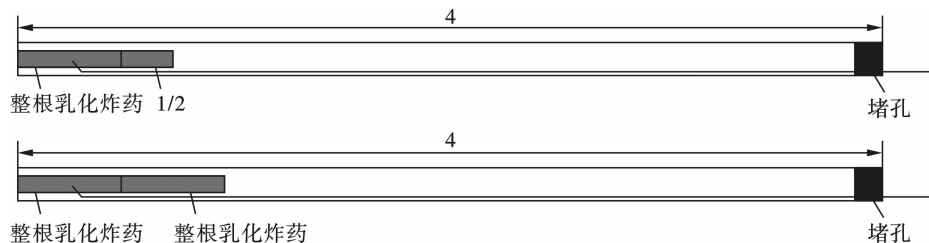


图 7 周边孔连续装药示意图(单位:m)

Fig. 7 Schematic diagram of continuous charge for peripheral hole(unit:m)

周边孔连续装药结构条件下, 开展不同装药量的 4 个爆破循环试验, 保持周边孔间距 50 cm、光爆层厚度 63 cm, 炮孔深度 4 m 不变。周边孔不同循环爆破参数见表 6。

周边孔连续装药时, 采用同段位雷管对周边孔进行引爆, 保证周边孔尽可能同时起爆, 实现控制围岩超欠挖的目的。各爆破循环爆破效果, 见图 8。

连续装药结构下不同装药量的爆破效果见表 7。

表 6 周边孔爆破循环参数表

Table 6 Peripheral hole blasting cycle parameters table

| 试验循环 | 周边眼单孔装药量/kg | 装药集中度/(kg·m ⁻¹) |
|------|-------------|-----------------------------|
| 1 | 0.60 | 0.15 |
| 2 | 0.45 | 0.12 |
| 3 | 0.3/0.45 | 0.075/0.12 |
| 4 | 0.3/0.60 | 0.075/0.15 |

注: 试验循环 3、4, 分别采用隔孔连续装药的方式, 即相邻周边孔一个炮孔药量多一个炮孔药量小。

表 7 爆破效果统计表

Table 7 Statistics of blasting effect

| 试验循环 | 炮孔残留率/% | 炮孔利用率/% | 平均线性超(+)欠(-)挖/cm |
|------|---------|---------|------------------|
| 1 | 21 | 96 | +26.8 |
| 2 | 25 | 93 | +25.2 |
| 3 | 32 | 91 | +24.0 |
| 4 | 30 | 94 | +25.4 |

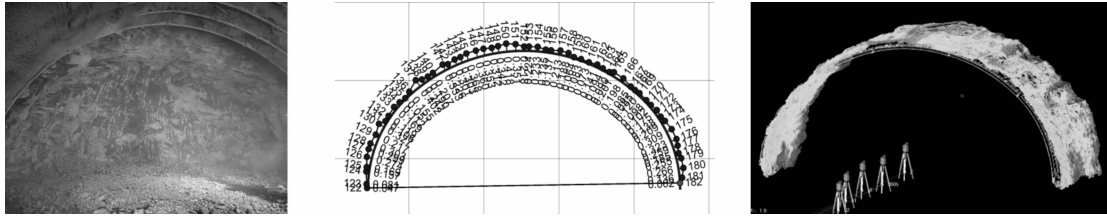


图8 试验循环爆破效果
Fig. 8 Test Cyclic Blasting Effect

现场试验表明:周边孔采用连续装药结构炮孔残留率普遍不高,残孔主要分布于拱顶部位,炮孔利用率均在90%以上。

周边孔连续装药量过大,孔底炸药能量容易集中,从而造成孔底部位超挖过大。试验循环3周边孔隔孔采用不同装药量装药,可以较好控制隧道围

岩超挖。

3.3 雷管间隔装药

施工中周边孔采用连续装药结构时,易发生“挂口”现象导致隧道欠挖。为了消除周边孔“挂口”现象,开展雷管间隔装药结构试验。周边孔装药结构示意图,见图9。

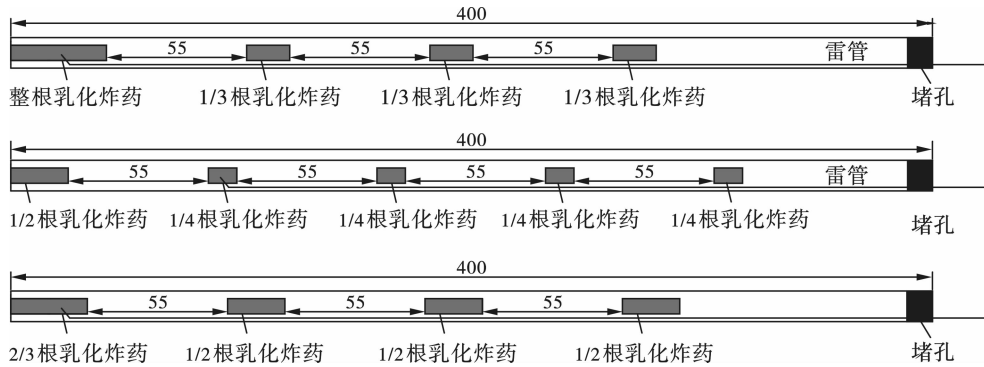


图9 周边孔雷管间隔装药结构示意图(单位:cm)
Fig. 9 Diagram of interval charge structure of peripheral hole detonator(unit:cm)

周边孔雷管间隔装药结构条件下,开展不同装药量的4个爆破循环试验。周边孔不同循环爆破参数见表8。

周边孔雷管空气间隔装药结构不同装药量的爆破效果,见图10。

雷管间隔装药结构下不同装药量的爆破效果见表9。

表8 周边孔爆破循环参数表

Table 8 Peripheral hole blasting cycle parameters table

| 试验循环 | 周边眼单孔装药量/kg | 装药集中度/(kg·m ⁻¹) |
|------|-------------|-----------------------------|
| 1 | 0.600 | 0.150 |
| 2 | 0.525 | 0.130 |
| 3 | 0.450 | 0.120 |
| 4 | 0.300 | 0.075 |

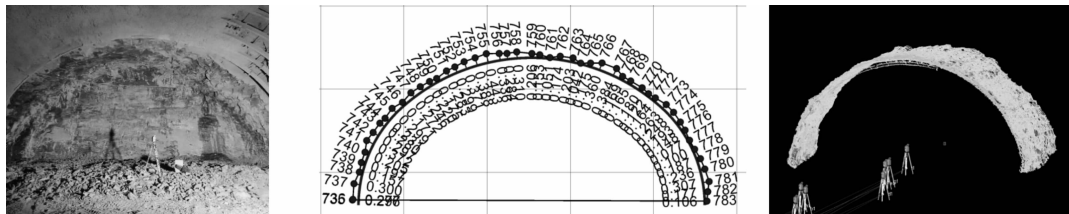


图10 试验循环爆破效果
Fig. 10 Test cycle blasting effect

现场试验表明:周边孔采用雷管空气间隔装药结构能够正常引爆间隔的炸药,炮孔残留率可以达到50%以上,炮孔利用率可以达到90%以上。爆破

循环4单孔装药量过小,造成大面积欠挖,最大欠挖值为25.4 cm。周边孔单孔装药量0.45 kg时隧道平均线性超挖最小。

表9 爆破效果统计表

Table 9 Statistics of blasting effect

| 试验 循环 | 炮孔 残留率/% | 炮孔 利用率/% | 平均线性超(+) 欠(-)挖/cm |
|----------|-------------|-------------|----------------------|
| 1 | 70 | 93 | +21.8 |
| 2 | 80 | 96 | +19.6 |
| 3 | 90 | 96 | +18.4 |
| 4 | 50 | 90 | -7.0 |

4 结论

(1)隧道光面爆破施工中,周边孔采用导爆索空气间隔装药结构能够较好的控制隧道超欠挖,也能保证开挖轮廓面表面平顺。雷管在围岩条件允许时可以替代导爆索实现空气间隔装药。

(2)光面爆破周边孔装药量根据围岩条件调整,在满足剥离光爆层围岩能量的前提下,周边孔装药量越小,隧道开挖轮廓面围岩损伤就越小,围岩超欠挖控制效果越好,周边孔炮孔残留率也越高。

(3)采用空气间隔装药结构时,遇有围岩破碎带、软弱夹层等地质要调整药卷间隔距离,避开上述不良地质体。同时,围岩完整时适当增加周边孔孔底药量,可以有效提高炮孔利用率,加快围岩钻爆开挖进度。

(4)光面爆破效果评价指标根据具体的围岩条件确定:Ⅴ级围岩主要控制超欠挖量,Ⅲ级、Ⅳ级围岩在控制超欠挖量的同时,还要关注周边孔炮孔残留率。

参考文献 (References)

- [1] 张继春. 工程控制爆破[M]. 成都:西南交通大学出版社,2001.
- [2] 张晓平,马建军,刘 令. 露天深孔空气间隔装药爆破的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程,2020,20(33):13599-13605.
- [2] ZHANG Xiao-ping, MA Jian-jun, LIU Ling. Research on numerical simulation of open air deep hole blasting with air interval charge[J]. Science Technology and Engineering,20,20(33):13599-13605. (in Chinese)
- [3] 徐帮树,张万志,石伟航,等. 节理裂隙层状岩体隧道掘进爆破参数试验研究[J]. 中国矿业大学学报,2019,48(6):1248-1255.
- [3] XU Bang-shu, ZHANG Wan-zhi, SHI Wei-hang et al. Experimental study on blasting parameters of jointed fissure layered rock mass in tunneling[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(6):1248-1255. (in Chinese)
- [4] 秦桂芳,曾 灿,徐间锋,等. 基于 HJC 损伤本构模型的灰岩隧道光面爆破数值模拟及工程验证[J]. 爆破器材,2022,51(6):45-51.
- [4] QIN Gui-fang, ZENG Can, XU Jian-feng et al. Numerical simulation and engineering verification of smooth Blasting in Limestone Tunnel based on HJC damage constitutive model[J]. Explosive Materials, 2022, 51(6):45-51. (in Chinese)
- [5] 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.
- [5] SONG Peng-wei, YANG Xin-an, LI Huai, et al. Optimization of charge structure of peripheral blasting holes based on shaped energy water pressure smooth blasting technology [J]. Tunnel Construction,2022,42(1):103. (in Chinese)
- [6] 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.
- [6] ZHAO Xiao-ming, YANG Yu-min, JIANG Nan, et al. Experimental study on optimization of charging structure around smooth blasting of deep-buried diversion tunnel [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(4):208-218. (in Chinese)
- [7] 谢 烽,江雅勤,余德运,等. 钙结砾岩空气间隔装药爆破试验及应用[J]. 爆破,2020,37(4):63-68.
- [7] XIE Feng, JIANG Ya-qin, YU De-yun, et al. Blasting test and application of air space charge for calcium conglomerate[J]. Blasting,20,37(4):63-68. (in Chinese)
- [8] 张 迅. 光面爆破不耦合装药参数优化的试验研究[J]. 工程爆破,2019,25(6):27-31.
- [8] ZHANG Xun. Experimental study on optimization of uncoupled charging parameters in smooth blasting[J]. Engineering Blasting,2019,25(6):27-31. (in Chinese)
- [9] 王圣涛,潘 强,郑爽英,等. 光面爆破在广州地铁隧道21号线中的应用[J]. 工程爆破,2019,25(4):26-31.
- [9] WANG Sheng-tao, PAN Qiang, ZHENG Zhi-ying, et al. Application of smooth blasting in Guangzhou Metro Tunnel Line 21 [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(4):26-31. (in Chinese)
- [10] 罗志光,张长亮,陈力华,等. 公路隧道不耦合装药光面爆破现场试验[J]. 地下空间与工程学报,2017(S2):578-584.
- [10] LUO Zhi-guang, ZHANG Chang-liang, CHEN Li-hua, et al. Field test of smooth blasting of uncoupled charge in highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2017(S2):578-584. (in Chinese)
- [11] FOURNEY W L, BARKER D B, HOLLOWAY D C. Model studies of explosive well stimulation techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining & Geomechanics Abstracts,1981,18(2):113-127.