

文章编号:1674-599X(2022)03-0072-07

山地硬岩隧道复式楔形掏槽爆破研究

钟华¹,梁裔举¹,蓝文甲¹,高山²,刘学³,陈璐⁴

(1. 广西路桥工程集团有限公司,广西 南宁 530011;2. 广西新发展交通集团有限公司,广西 南宁 530029;
3. 江西铜业集团有限公司武山铜矿,江西 瑞昌 332204;4. 长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114)

摘要:针对硬岩隧道掏槽块度大、抛渣效率低的问题,以百龙滩2号隧道为工程背景,运用动力分析软件LS-DYNA建立复式楔形掏槽模型,分析不同中间孔深度及延迟时间条件下复式楔形掏槽的爆破效果。研究表明:布置中间孔能明显降低岩石大块率,提高岩石的破碎效果。当中间孔与掏槽孔垂深比值 a 为0.7时,岩石破碎效果最好,随着 a 的增加,岩石破碎效果逐渐降低。当中间孔与斜孔同时起爆时,岩石的破碎效果最佳,斜孔延时起爆对岩石的破碎效果影响不大,但会提高抛渣效率。该研究成果在隧道爆破中有效地提高了岩体的破碎程度,保证了现场的施工进度。

关键词:中间孔;复式楔形掏槽;数值模拟;岩石破碎

中图分类号:U455.6 **文献标志码:**A

Research on compound wedge-shaped cutting in mountain hard rock tunnel

ZHONG Hua¹, LIANG Yiju¹, LAN Wenjia¹, GAO Shan², LIU Xue³, CHEN Lu⁴

(1. Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Nanning 530011, China;

2. Guangxi Xinfazhan Communication Group Co., Ltd., Nanning 530029, China;

3. Jiangxi Copper Group Co., Ltd., Wushan Copper Mine, Ruichang 332204, China;

4. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract:For the problems of large block size and low slag throwing efficiency in cut blasting of hard rock tunnel, the numerical model of compound wedge-shaped cutting was established using the LS-DYNA. The blasting effect of compound wedge cutting under different hole depth and delay time was analyzed. The results show that the middle hole can be utilized to reduce the large lump rate and improve the breakage effect of rock. When the vertical depth ratio a of middle hole to cut hole is 0.7, the rock can be broken satisfactorily. The rock breakage effect gradually decreases with the increase of the ratio a . When the middle and inclined hole are detonated at the same time, the rock breakage is most severe. The delay initiation of inclined hole has little effect on rock breakage, however it can improve slag throwing effect. The research results has been used to improve the degree of rock fragmentation in tunnel blasting, ensuring the construction progress.

Key words:middle hole; compound wedge-shaped hollowing; numerical simulation; rock breakage

公路隧道钻爆开挖时,为提高爆破掘进效率,在掌子面中部位置设置掏槽,爆破形成槽腔,为后续崩落爆破提供自由面^[1-4]。其中,楔形掏槽具有布置炮眼数目少,炮眼钻进精度要求低等优点。由于

收稿日期:2022-05-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52004036);湖南省自然科学基金资助项目(2021JJ40572);湖南省教育厅科学研究优秀青年项目(20B040);广西交通运输行业重点科技项目(2020-24);江汉大学省部共建精细爆破国家重点实验室、江汉大学爆破工程湖北省重点实验室联合开放基金资助项目(PBSKL2022D02)

作者简介:钟华(1983—),男,广西路桥工程集团有限公司总工程师。

岩体条件等因素影响,在大断面公路隧道爆破工程中,楔形掏槽爆破后极易出现大块岩体^[5]。不仅影响现场出渣速度,而且需要二次补炮破碎,造成人力和财力的浪费。因此,提高楔形掏槽的岩石破碎效果具有重要意义。

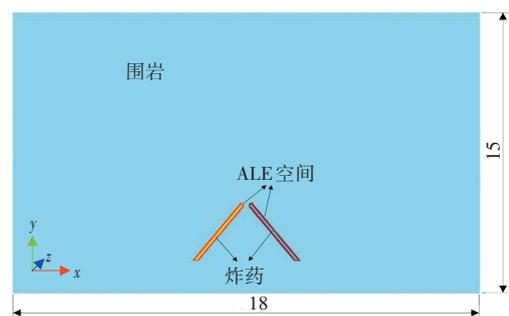
近年来,为提高掏槽爆破的岩石破碎效果,学者们围绕掏槽爆破开展了大量的研究。刘优平等^[6]从理论上分析了中空孔的应力集中效应,发现大直径空孔有利于反射拉伸波,并提高了破岩效果。李启月等人^[7]利用数值分析方法,研究了不同直径空孔的空孔效应和槽腔岩石破坏特性。杨国梁等人^[8]建立了多孔复式楔形掏槽的三维模型,研究发现中间孔可增大槽腔岩体的破碎效果,并增强了破碎岩体的抛掷作用。吕存书^[9]在巷道掘进中应用了大直径中孔直眼掏槽爆破技术,提高了掘进效率,缩短了爆破后的辅助工序时间。罗剑辉等人^[10]分别建立了有、无中空孔的数值模型,分析了应力场的演化历程和岩体破坏的特征。杨仁树等人^[11]在斜孔掏槽基础上增加了直孔掏槽,提出“准楔形复式+超深”的掏槽爆破方式,并进行了现场试验研究。龚敏等人^[12]利用LS-DYNA软件开展了掏槽参数优化研究,数值计算结果表明:掏槽中间孔能够改善槽腔区孔底受力状态,形成贯通的破碎区域,可提高隧道的爆破进尺。为提高槽腔岩体的破碎效果,吴立辉等人^[13]分析了毫秒延期时间对岩石破碎效果的影响,而楼晓明等人^[14]则基于岩石破碎机理的分析,优化了微差爆破最佳延期时间。这些研究集中于掏槽爆破的中孔效应,而对复式楔形掏槽的布置及延期时间对破岩效果的研究较少。本研究针对百龙滩2号隧道的楔形掏槽破岩效果不理想等工程问题,利用LS-DYNA软件,建立数值模型,分析不同的中间孔深度和延期时间对复式楔形掏槽爆破的岩石破碎效果的影响,并指导了现场掏槽爆破的参数设计,解决硬岩隧道掏槽块度大、抛渣效率低等工程问题。

1 数值模拟

1.1 数值模型

基于现场条件,运用ANSYS/LS-DYNA有限元软件,分别建立无中间孔和3种不同中间孔深度的二

维楔形掏槽爆破模型。数值计算模型如图1所示,模型长18 m,宽15 m。其中,图1(a)为无中间孔的楔形掏槽模型,根据现场隧道爆破方案,掏槽孔角度 54° ,垂深3.8 m,炮孔直径42 mm,采用不耦合装药结构,装药长度2.9 m,堵塞长度1.7 m。图1(b)~1(d)为有中间孔的模型,中间孔与掏槽孔垂深比值 α 分别为1.3、1.0和0.7,中间孔的装药长度分别为3.50、2.36和1.19 m,堵塞长度保持一致,均为1.44 m。



(a) 无中间孔



(b) 3.50 m深中间孔



(c) 2.36 m深中间孔



(d) 1.19 m深中间孔

图1 数值计算模型(单位:m)

Fig. 1 Numerical calculation model(unit:m)

1.2 材料模型及参数

选用LS-DYNA内嵌的RHT模型来表征岩体的

损伤情况,根据现场工程岩体力学实测参数及相关研究确定了具体参数^[15-16],见表1。

表1 模型岩石参数

Table 1 Parameters of the rock using in model

参数	数值	参数	数值	参数	数值
密度/(g·cm ⁻³)	2.7	拉伸应变率指数	0.036	相对剪切强度	0.18
相对拉伸强度	0.04	弹性剪切模量/GPa	37.5	系数A ₁	35.27
损伤参数D ₁	0.04	损伤参数D ₂	1	破坏面参数A	1.6
系数A ₂	39.58	系数A ₃	9.04	参考压缩应变率	3×10 ⁻⁵
破坏面参数N	0.61	破碎压缩应变率	3×10 ²⁵	破碎拉伸应变率	3×10 ²⁵
参考拉伸应变率	3×10 ⁻⁶	洛德角相关因子B	0.01	压缩屈服面参数	0.53
洛德角相关因子Q ₀	0.68	粉碎压力/MPa	125	压实压力/GPa	6
拉伸屈服面参数	0.7	侵蚀塑性应变	2	最小损伤残余应变	0.01
剪切模量降低因子	0.5	初始孔隙度	1	拉伸塑性流动参数	0.001
孔隙度指数	3	压缩强度/MPa	167.8	压缩应变率相关指数	0.032

炸药选用LS-DYNA软件内嵌的MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN材料模型,并采用EOS_JWL状态方程描述其作用特征,其表达式为:

$$P_e = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (1)$$

式中: P_e 和 V 分别为爆轰产物的压力和相对体积; E_0 为单位体积内能; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料常数。

参照已有的模拟试验研究可知,炸药密度为1.250 g/cm³,爆轰速度为4 000 cm/s, $A=214.4$ GPa, $B=18.2$ GPa, $R_1=4.2$, $R_2=0.9$, $\omega=0.15$, $E_0=4.192$ GPa。

空气选用MAT_NULL材料模型,并采用EOS_LINEAR_POLYNOMIAL状态方程来描述其本构关系,其表达式为:

$$P_e = C_0 + C_1 \mu + C_2 \mu^2 + C_3 \mu^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) E_0 \quad (2)$$

式中: P_e 为压强; $C_0 \sim C_6$ 分别为状态方程常数; μ 为黏滞系数; E_0 为单位体积内能。

在理想气体模型中,密度为1.225 g/cm³, $C_4 \sim C_5$ 均为0.4, $C_0 \sim C_3$ 和 C_6 均为0。

2 模拟结果分析

2.1 中间孔深度对破岩效果的影响

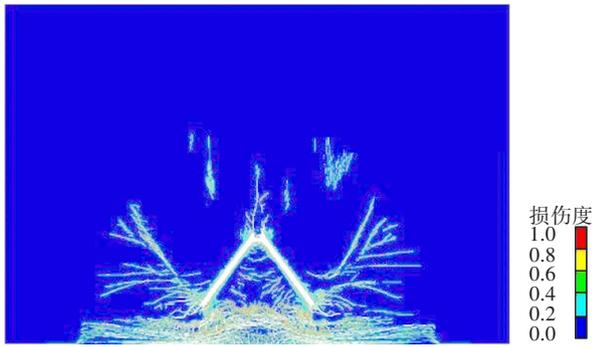
为研究中间孔对楔形掏槽爆破岩石破碎效果

的影响,基于数值模拟分析得到了不同中间孔深度掏槽爆破时的损伤云图,如图2所示。

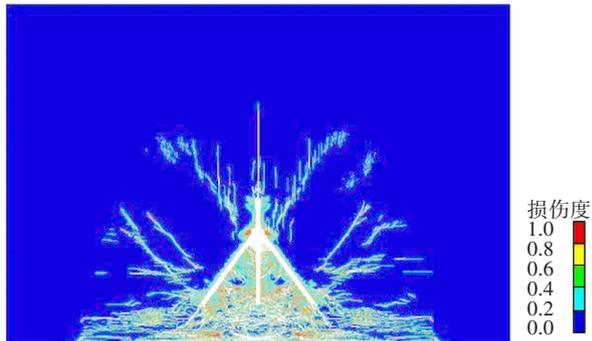
从图2(a)可以看出,当不设置中间孔时,掏槽区岩体整体的损伤程度较小。由于夹制作用,掏槽孔周边的岩石破碎效果较差,爆破后会产生较大的岩块。从图2(b)中可以看出,当增设深度为3.50 m的中间孔时,掏槽孔的孔底区域的岩石损伤严重,但在掏槽区仍存在未破损的岩体,岩石破碎效果较差。从图2(c)中可以看出,当中间孔深度减小到2.36 m(即中间孔深度与掏槽孔垂深相同)时,掏槽孔周边的岩石破碎效果略有提高,但中间孔孔口外侧区域岩体损伤较小,爆破后仍容易产生大块岩体。从图2(d)可以看出,当中间孔深度为1.19 m时,中间孔完全位于掏槽区,爆破炸药的能量直接作用于掏槽区的岩体,岩石整体的破碎效果良好。这表明:无中间孔的楔形掏槽爆破容易出现大体积岩块,增设中间孔对楔形掏槽孔爆破的岩石破碎效果较好。当中间孔深度大于或等于楔形掏槽深度时,中间孔和掏槽孔周围的岩石破碎效果并不理想,爆破后仍可能出现较大岩块。当中间孔深度小于楔形掏槽深度时,岩石整体的损伤最大,破碎效果最好。

2.2 不同延期对破岩效果的影响

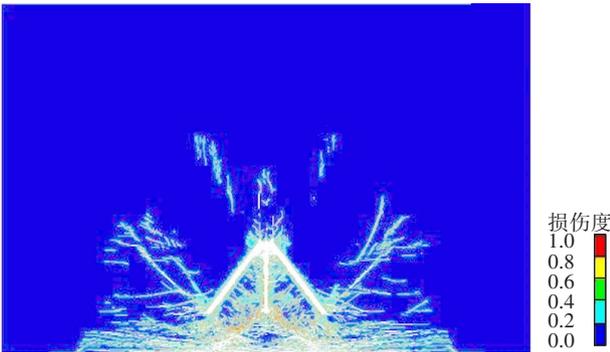
为研究不同延期对岩石破碎效果的影响,以中间孔深度为1.19 m的数值模型为例,分别将掏槽斜孔的起爆时间延迟5、10和25 ms,分析斜孔不同延期起爆对槽腔岩体损伤演化的影响。



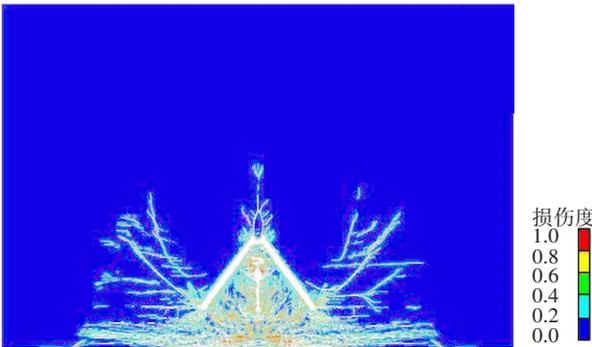
(a) 无中间孔



(b) 中间孔深度 3.50 m



(c) 中间孔深度 2.36 m



(d) 中间孔深度 1.19 m

图2 掏槽爆破岩体损伤云图

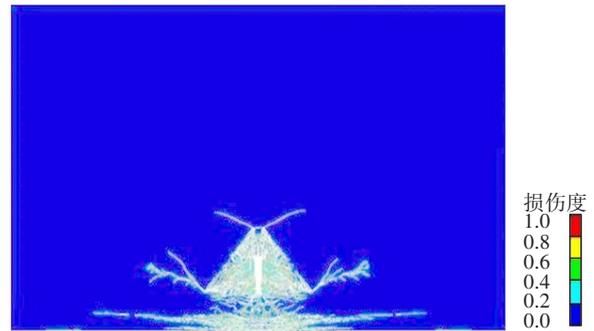
Fig.2 The rock damage cloud of cut blasting

斜孔延期 5 ms 起爆时,槽腔岩体的损伤演化过程如图 3 所示。当延迟时间 $T=1$ ms 时,在中间孔爆破载荷的作用下,腔内的岩体发生严重损伤。同时,由于隧道掌子面单侧临空,在动态拉应力

的作用下,中间孔孔口周围区域发生了明显损伤。当 $T=2$ ms 时,由于空孔效应,掏槽孔孔口和孔底出现应力集中,形成明显的裂隙。在 T 为 3~5 ms 时,随着爆炸应力波的传播,掏槽孔孔口和孔底处的裂隙继续扩展,中孔孔口周围的岩体损伤加剧。当 T 为 6~7 ms 时,在掏槽斜孔爆破载荷的作用下,掏槽孔周边形成了许多裂隙,岩体损伤进一步加剧,槽腔内的碎块岩石被抛出。



(a) $T=1$ ms



(b) $T=2$ ms



(c) $T=3$ ms



(d) $T=4$ ms

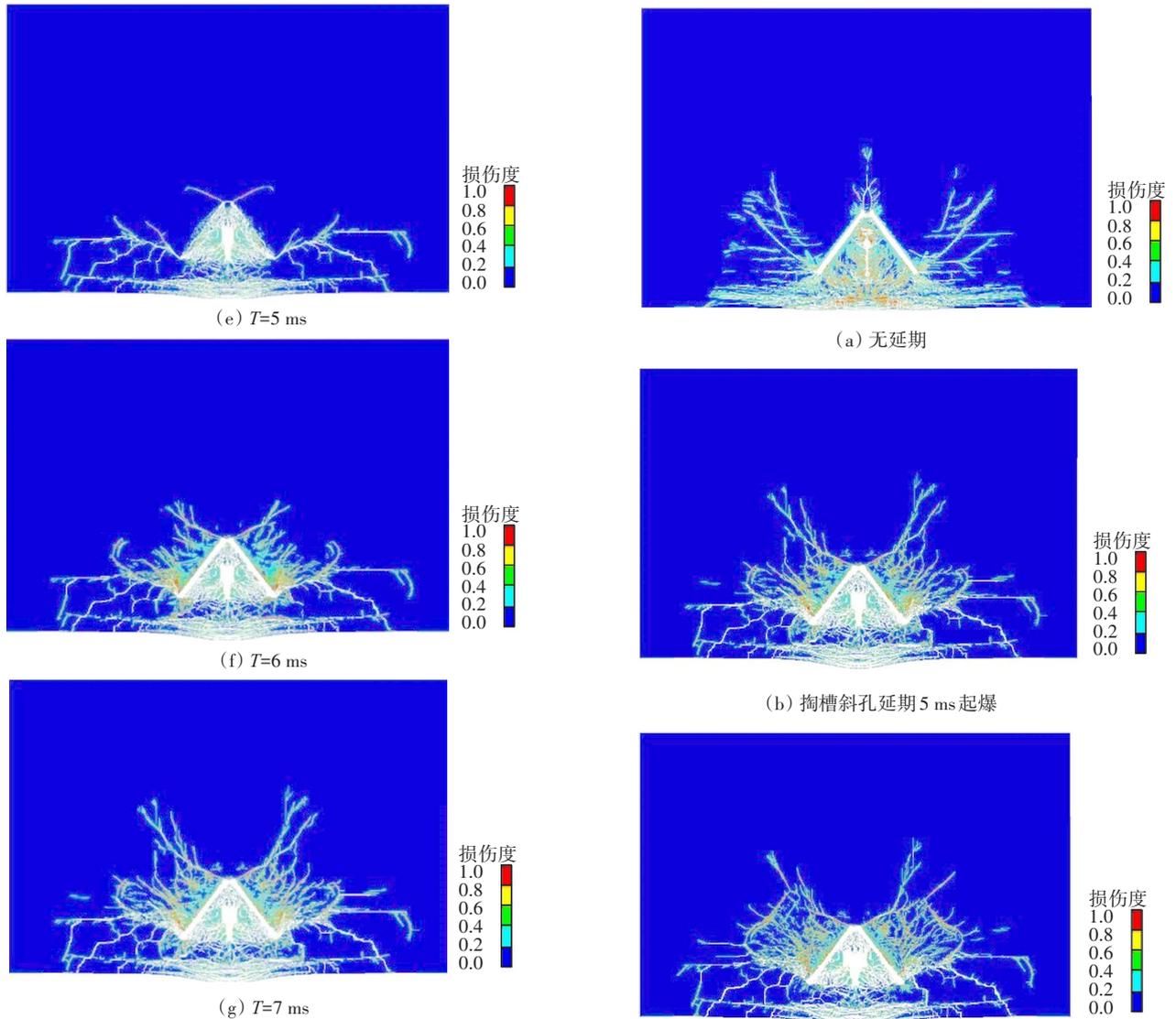


图3 岩石损伤演化过程

Fig.3 Rock damage evolution process

掏槽斜孔分别延期5、10、25 ms时,起爆的岩体损伤效果对比如图4所示。从图4(a)可以看出,当直孔与斜孔同时起爆时,掏槽区的岩石损伤程度大,岩体的整体破碎效果最好。从图4(b)可以看出,当斜孔延期5 ms起爆时,掏槽孔外侧的岩体损伤程度增加,中间孔和掏槽孔的孔口部位的岩体损伤程度明显下降,爆破后会出现较大的岩块。从图4(c)~4(d)可以看出,当延期时间增加到10 ms和25 ms时,掏槽孔外侧的岩体损伤程度进一步加剧,而掏槽孔孔口仅出现了几条裂隙,并没有发生明显损伤,但掌子面外侧出现较大裂纹,会有效提高抛渣效果。

从图4还可以看出,当中间孔和掏槽斜孔同时起爆时,炸药的能量会集中在掏槽区内部,使得该

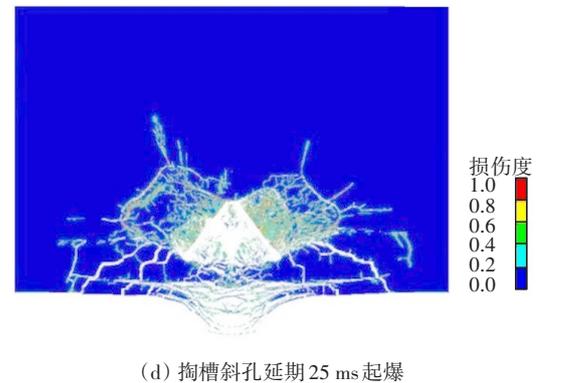


图4 不同延期掏槽起爆岩体损伤云图

Fig.4 Damage cloud of rock considering delay effect

区域的岩体产生较大程度的损伤,岩石的破碎效果较好。当中间孔先起爆时,炸药的能量对中间孔周围岩体造成损伤,掏槽斜孔再起爆时岩体会发生爆炸,同时应力波叠加,产生累积损伤效应,掏槽孔外

侧的损伤会进一步加剧。在掏槽斜孔的内侧区域,由于中间孔起爆早,已形成了自由面,掏槽孔炸药爆炸后产生的能量及爆生气体,沿着岩石裂隙泄露,使得该区域的岩体损伤程度较小,爆破后仍易出现较大的岩体。

3 工程应用

本研究以来都路百龙滩2号隧道为工程背景。该隧道位于广西省河池市都安瑶族自治县境内,隧道区属溶峰丛洼地谷地地貌,地形起伏较大。地层主要由二叠系下统基岩组成,隧道围岩为灰白色的中风化灰岩,具有隐晶质结构和中厚至巨厚层状结

构,岩质坚硬,岩体较完整。

该隧道钻爆开挖采用一级楔形掏槽,掏槽腔内部岩体极易形成大岩块。爆破后产生巨大岩块,不仅影响了现场出渣速度,降低了生产效率,而且需要进行二次补炮,造成了人力和物力的浪费。

为提高一级斜孔掏槽的破碎效果,根据数值模拟结果,对原掏槽方案进行了优化,如图5所示。在楔形掏槽中增设中间孔,采用孔底装药,装药量为0.3~0.6 kg,具体药量根据现场岩体条件确定。中间孔与掏槽孔同时起爆,改进的楔形掏槽破岩效果如图6所示。试验表明:增设中间孔可以明显改善楔形掏槽破岩效果,现场爆破未出现较大的岩块,保证了现场的施工效率。

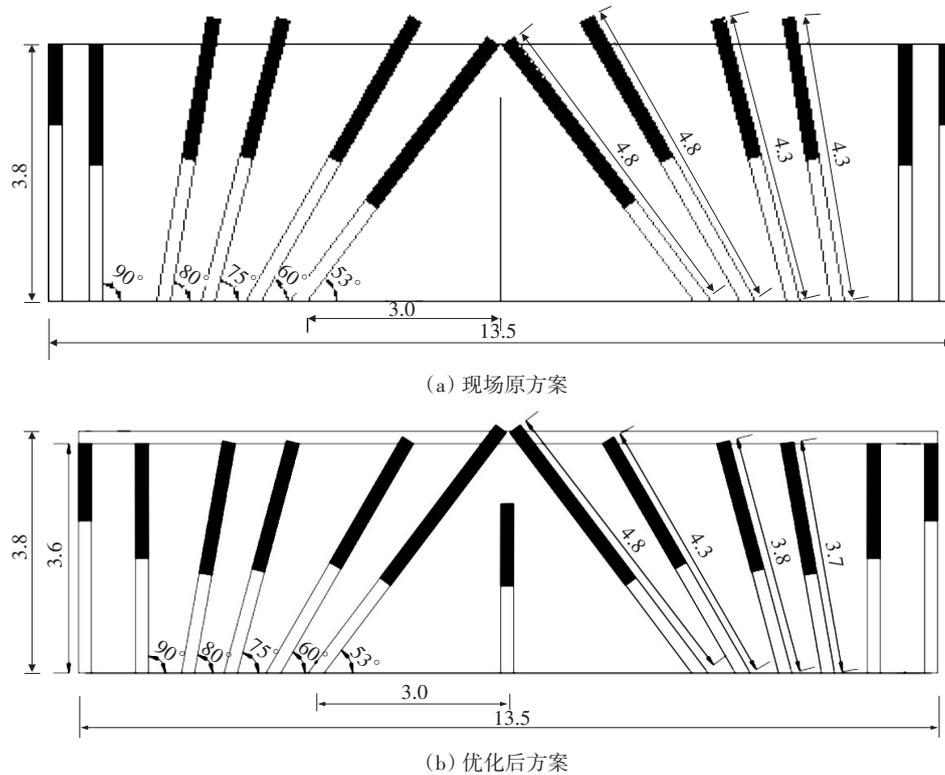


图5 掏槽优化方案(单位:m)

Fig. 5 Optimization scheme of cutting blasting(unit:m)



图6 岩石破碎效果

Fig. 6 Rock fragmentation effect

4 结论

公路隧道楔形掏槽爆破时,易出现大块岩体。本研究基于百龙滩2号隧道,开展了数值模拟与现场试验,提出了复式楔形掏槽方式,改善了掏槽效率。得到结论为:

- 1) 公路隧道楔形掏槽爆破时,可增设中间孔改善楔形掏岩爆破的破碎效果,避免出现大块岩石。

2) 复式楔形掏槽爆破中,中间孔与掏槽孔深度比值 α 为0.7时,掏槽区的岩石破碎效果最佳,随着 α 的增加,岩石破碎程度逐渐下降。

3) 当中间孔与掏槽斜孔同时起爆时,掏槽区的岩石破碎效果最佳,掏槽斜孔的不同延期时间对岩石的破碎效果影响不大,但增加延期时间有利于抛渣。

参考文献(References):

- [1] 黄宝龙. 岩巷掘进掏槽爆破理论与技术研究进展[J]. 中国矿业, 2014, 23(10): 103-106. (HUANG Baolong. Progress on theory and technique of cutting blast in rock drivage[J]. China Mining Magazine, 2014, 23(10): 103-106.(in Chinese))
- [2] 朱和昆, 张庆彬, 李传华, 等. 上跨临近既有线隧道爆破振动响应分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 65-71. (ZHU Hekun, ZHANG Qingbin, LI Chuanhua, et al. Blasting vibration response of the existing tunnels to the neighboring and overpassing tunnel[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 65-71.(in Chinese))
- [3] 谢理想, 卢文波, 姜清辉, 等. 深部岩体在掏槽爆破过程中的损伤演化机制[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(5): 1252-1260. (XIE Lixiang, LU Wenbo, JIANG Qinghui, et al. Damage evolution mechanism of deep rock mass in process of cut blasting [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(5): 1252-1260.(in Chinese))
- [4] 王宪孟. 全断面光面爆破在三车道隧道施工中的应用[J]. 公路与汽运, 2007(3): 169-171. (WANG Xianmeng. Application of full-facesmooth blasting in three-lane tunnel construction[J]. Highways & Automotive Applications, 2007(3): 169-171.(in Chinese))
- [5] 杨军, 任光, 于琦, 等. 台阶爆破岩石破碎楔块理论及数值模拟研究[J]. 爆破, 2015, 32(3): 55-61, 90. (YANG Jun, REN Guang, YU Qi, et al. Wedge theory of rock fragmentation for bench blasting and its numerical simulation [J]. Blasting, 2015, 32(3): 55-61, 90. (in Chinese))
- [6] 刘优平, 黎剑华, 林大能, 等. 掏槽爆破中空孔效应的理论与试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2007(5):75-77. (LIU Youping, LI Jianhua, LIN Daneng, et al. Theoretical and experimental study on the effect of hollow holes in trenching and blasting [J]. Mining Research and Development, 2007(5): 75-77.(in Chinese))
- [7] 李启月, 徐敏, 范作鹏, 等. 直眼掏槽破岩过程模拟与空孔效应分析[J]. 爆破, 2011, 28(4): 23-26. (LI Qiyue, XU Min, FAN Zuopeng, et al. Simulation of rock failure process in cutting by parallelhole and analysis on empty hole effect [J]. Blasting, 2011, 28(4): 23-26.(in Chinese))
- [8] 杨国梁, 姜琳琳, 杨仁树. 复式楔形深孔掏槽爆破研究[J]. 中国矿业大学学报, 2013, 42(5): 755-760. (YANG Guoliang, JIANG Linlin, YANG Renshu. Investigation of cut blasting with duplex wedge deep holes [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2013, 42(5): 755-760.(in Chinese))
- [9] 吕存书. 中孔直眼掏槽深孔爆破技术在岩巷掘进中的应用[J]. 中国战略新兴产业, 2018(24): 157. (LYU Cunshu. Application of straight hole cutting and deep hole blasting technology in rock roadway excavation[J]. China Strategic Emerging Industry, 2018(24): 157.(in Chinese))
- [10] 罗剑辉, 程兵, 汪海波, 等. 中空孔对直眼掏槽爆破效果的影响数值模拟[J]. 煤矿安全, 2020, 51(4): 223-226. (LUO Jianhui, CHENG Bing, WANG Haibo, et al. Numerical simulation of influence of hollow hole on blasting effect of parallelcut [J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(4): 223-226.(in Chinese))
- [11] 杨仁树, 王雁冰, 张召冉, 等. 井巷工程掏槽爆破新技术及应用[J]. 中国科学基金, 2022, 36(1): 120-127. (YANG Renshu, WANG Yanbing, ZHANG Zhaoran, et al. New technology and application of cutting blasting in shaft and roadway engineering [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2022, 36(1): 120-127.(in Chinese))
- [12] 龚敏, 文斌, 王华. 掏槽参数对煤矿岩巷爆破效果的影响[J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(4): 576-584. (GONG Min, WEN Bin, WANG Hua. Influences of cut parameters on blasting effect in rock roadway of coal mine [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(4): 576-584.(in Chinese))
- [13] 吴立辉, 李洪伟, 聂华君, 等. 毫秒延期时间对岩石破碎效果影响的实验研究[J]. 火工品, 2020(4): 52-56. (WU Lihui, LI Hongwei, NIE Huajun, et al. Experimental study on the effect of millisecond delay Time on rock fragmentation [J]. Initiators & Pyrotechnics, (下转第106页))

- [8] 刘小燕, 邹爱平, 朱杰, 等. 大跨度桥梁挂篮施工风险评估[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2020, 17(4): 16-22. (LIU Xiaoyan, ZOU Aiping, ZHU Jie, et al. Risk assessment of hanging basket construction of long-span bridge[J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2020, 17(4): 16-22. (in Chinese))
- [9] 林元培. 现代大跨度桥梁的设计理念与发展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2011, 30(S2): 1080-1083, 1098. (LIN Yuanpei. The design concept and future development of modern long span bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2011, 30(S2): 1080-1083, 1098. (in Chinese))
- [10] 鲍卫刚, 周泳涛. 预应力混凝土梁式桥梁设计施工技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009. (BAO Weigang, ZHOU Yongtao. Technical guide for design and construction of prestressed concrete beam bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2009. (in Chinese))
- [11] 周先雁, 王解军. 桥梁工程[M]. 北京: 北京大学出版社, 2008. (ZHOU Xianyan, WANG Jiejun. Bridge engineering [M]. Beijing: Peking University Press, 2008. (in Chinese))
- (责任编辑: 罗容; 校对: 李脉 欧兆虎; 英文编辑: 陈璐)

(上接第78页)

- 2020(4): 52-56. (in Chinese))
- [14] 楼晓明, 周文海, 简文彬, 等. 岩石破碎机理的微差爆破最佳延时控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(2): 158-163. (LOU Xiaoming, ZHOU Wenhai, JIAN Wenbin, et al. Millisecond blasting optimal time delay control based on rock breaking mechanism[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(2): 158-163. (in Chinese))
- [15] LI X H, ZHU Z M, WANG M, et al. Numerical study on the behavior of blasting in deep rock masses [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 113: 103968.
- [16] 凌同华, 欧阳雄志, 刘建伟, 等. 爆破振动下双洞隧道衬砌动力响应分析[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 20-27. (LING Tonghua, OUYANG Xiongzi, LIU Jianwei, et al. Dynamic response analysis of double tunnel lining under blasting vibration [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 20-27. (in Chinese))
- (责任编辑: 罗容; 校对: 李脉 欧兆虎; 英文编辑: 陈璐)