

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.04.009

上软下硬岩体大断面隧道掏槽爆破技术优化^{*}

朱永学¹,王丙坤¹,谢丰泽¹,徐帮树²,张万志^{2,3},张剑¹,蒋勇¹

(1. 中铁隧道集团二处有限公司,廊坊 065201;2. 山东大学 岩土与结构工程研究中心,济南 250061;

3. 山东交通学院 交通土建工程学院,济南 250357)

摘要: 针对上软下硬岩体大断面隧道掏槽爆破开挖存在掌子面中底部欠挖和超大尺寸块石的问题,依托海螺岭隧道工程背景,应用现场调研和试验的手段,提出了隧道掏槽爆破技术的优化方法。基于掌子面上软下硬的岩体特征,从减小掏槽爆破孔口距和装药集中度的方面,提出了复式楔形掏槽方式、增加掏槽孔数量、减小掏槽孔最大单孔装药量和增设底孔等措施。结果表明:采用优化的掏槽爆破技术,可消除掌子面中底部的欠挖,形成平整的开挖掌子面和底面;大大减小了爆后块石尺寸,最大边长减小60%;炮孔利用率提高3.4%,炸药单耗减小0.03 kg/m³。

关键词: 隧道工程;大断面;上软下硬;掏槽爆破;大块石

中图分类号: U451 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)04-0053-06

Optimization of Cutting Blasting Technology for Large Cross-section Tunnel in Upper Soft and Lower Hard Rock Mass

ZHU Yong-xue¹, WANG Bing-kun¹, XIE Feng-ze¹, XU Bang-shu²,
ZHANG Wan-zhi^{2,3}, ZHANG Jian¹, JIANG Yong¹

(1. China Railway Tunnel Group No. 2 Co Ltd, Langfang 065201, China;

2. Geotechnical and Structural Engineering Research Center, Shandong University, Jinan 250061, China;

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

Abstract: In order to solve the problems of underbreak in the bottom of the tunnel face and big block caused of the large cross-section tunnel with upper soft rock and lower hard rock by cutting blasting excavation, based on the Hailuoyu tunnel project, the optimization method of cutting blasting technology was proposed by using the on-site investigation and experiment. Taking into account of reducing the hole spacing and charging concentration of cut blasting, the optimized cutting blasting parameters, such as the duplex wedge cut design, adding cut holes, reducing the maximum single hole charge of the cut hole, and adding bottom holes, were proposed by analyzing the characteristics of the soft and hard rock mass. The results show that the underbreak at the middle and bottom of the tunnel face can be avoided due to the optimized cutting blasting technology, forming a flat excavation face and bottom surface. The block size can be greatly reduced, and its maximum side length is reduced by 60%. The utility of the blasting holes is increased by 3.4% and the powder factor is reduced by 0.03 kg/m³.

Key words: tunnel engineering; large cross-section; soft to hard rock; cut blasting; big block

收稿日期:2020-07-20

作者简介:朱永学(1979-),男,黑龙江富裕人,大学本科,主要从事公路及铁路隧道爆破参数试验研究,(E-mail)418117479@qq.com。

通讯作者:张万志(1988-),男,山东泰安人,讲师,主要从事山岭隧道爆破机理及爆破参数优化研究,(E-mail)zwzwanzhi@163.com。

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(50909056);山东省自然科学基金面上项目(ZR2014EEM014)

随着我国基础设施建设的快速发展,双向六车道及八车道大断面山岭隧道工程日趋增多。当前,山岭隧道掘进开挖多采用光面爆破开挖方法,且掏槽爆破方式主要以楔形掏槽为主。由于隧道横断面

较大,其洞身段常存在岩体软硬不均、上软下硬或上硬下软等情况,此时常因爆破参数不合理,造成隧道超挖或欠挖。针对掌子面上软下硬的情况,若掏槽孔楔形设计的炮孔数量、间距、布置形式及装药量等参数设计不合理,爆破开挖后常出现大块石、掌子面欠挖及爆破振动过大等不良影响^[1-3]。

影响隧道掏槽爆破效果的因素主要包括两类:围岩地质特征和掏槽爆破参数。其中,围岩地质特征包括岩体类型及分布、岩石力学性质及软弱结构面等;掏槽爆破技术包括掏槽孔形式、炮孔参数、装药参数以及爆破荷载作用等^[4-8]。目前,由于工程地质环境复杂多变、爆破荷载的瞬时作用和爆炸荷载作用下爆破介质的非线性力学行为,隧道楔形掏槽爆破岩成型机理尚没有相对成熟的研究成果,学者多基于工程实践经验、现场试验及数值模拟等方法开展相关研究。邹新宽通过分析楔形分段毫秒延迟掏槽爆破机理,依托实际工程,提出了掏槽深度比、段间装药分配比、炮孔倾角和段间延迟时间等掏槽爆破关键参数的确定方法^[9,10]。石洪超采用现场振动监测和数值计算相结合的方法,研究了楔形掏槽孔的布置角度对爆破开挖振动极值和最大振动速度出现位置的影响^[11]。龚敏等通过开展现场单掏槽孔单自由面爆破实验,获得了其不同装药量和时间振

动曲线,同时应用 MATLAB 获得了多孔微差掏槽爆破后的累加曲线,确定了安全药量计算方法^[12]。吉凌等依托实际隧道工程,应用理论分析和数值模拟等方法提出了适用于特大断面隧道的倒 T 型掏槽爆破方法,提高了炮孔利用率,且降低了炸药单耗^[13]。上述研究多集中在大断面掏槽爆破参数对爆破掏槽体积及爆破振动的影响,而针对上软下硬的岩体特征,掏槽爆破后出现掌子面欠挖及大块石的情况研究较少。

为此,基于海螺峪隧道现场掏槽爆破试验,研究了大断面上软下硬隧道楔形掏槽参数对隧道爆破效果的影响。研究成果对该类隧道工程掏槽爆破设计及提高掘进开挖进度具有一定的指导意义。

1 工程实例

1.1 工程概况

高速公路工程海螺峪隧道位于山东省济南市历城区锦绣川镇海螺峪村。隧道为左、右线分离式隧道,左线起讫里程为 Z1K11+445~Z1K14+280,长 2835 m;右线为 K11+395~K14+410,长 3015 m。隧址区地形起伏较大,地面高程 260.0~670.0 m,相对高差 410 m;隧道埋深 40~200 m,最大埋深约 380 m。海螺峪隧道地质纵剖面图如图 1 所示。

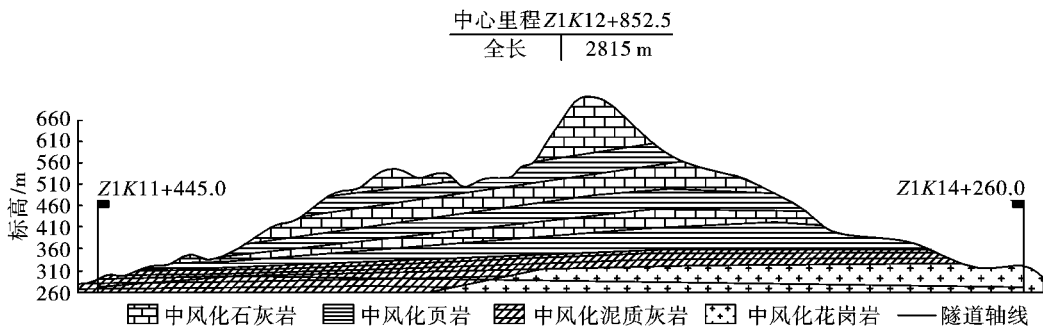


图 1 海螺峪隧道地质纵剖面图

Fig. 1 The geological longitudinal profile of the Hailuoyu tunnel

海螺峪隧道 IV 级围岩左线长 500 m、右线长 320 m;V 级围岩左线长 2275 m、右线长 2695 m。隧道为双向六车道,其 V 级围岩段隧道标准开挖断面设计高度 12.16 m、宽度 18.20 m,如图 2 所示。

1.2 工程地质概况

根据工程地质测绘资料和钻探报告,隧址区洞身岩性为中风化泥质灰岩,灰黄色;或中风化石灰岩,青灰色;或中风化页岩,褐红色;或中风化花岗岩,灰绿色。其中中风化泥质灰岩单轴抗压强度约为 10 MPa,中风化页岩单轴抗压强度约为 11 MPa,而中风化石灰岩单轴抗压强度约为 50 MPa,中风化

花岗岩单轴抗压强度约为 65 MPa,存在地层岩性不一,岩体软硬不均的情况。

2 掏槽爆破存在的问题

2.1 掏槽爆破方案

海螺峪隧道试验段 Z1K12+065~Z1K12+185,均为 V 级围岩,洞身段岩体特征为拱顶至拱腰分布中风化泥质灰岩或页岩,岩体完整性及强度较差;而拱腰至拱脚分布中风化石灰岩,岩体完整性及强度较好。该段采用上、下台阶法开挖,上台阶开挖宽度为 18.0 m、高度为 7.5 m,开挖面积约为

105.1 m²。考虑凿岩台车的宽度,为便于掏槽孔钻孔和满足掏槽腔体积大小要求,上台阶掏槽孔爆破采用四级楔形掏槽,掏槽孔钻孔布置如图 3 所示,一级掏槽孔(主掏槽孔)炮孔孔口距约为 8.0 m,一级至四级掏槽孔每两排炮孔孔口距约为 80 cm,每排炮孔竖向间距为 70~90 cm;每循环进尺约为 4.0 m,一级至四级掏槽孔与掌子面的夹角分别为 47°、58°、66°和 77°,炮孔长度分别为 5.7、4.8、4.4 和 4.1 m。掏槽爆破使用 2 号岩石乳化炸药,为毫秒延迟起爆,自一级至四级掏槽孔逐级爆破,起爆时差约为 50 ms。掏槽孔的装药参数见表 1,总装药量为 127.2 kg。

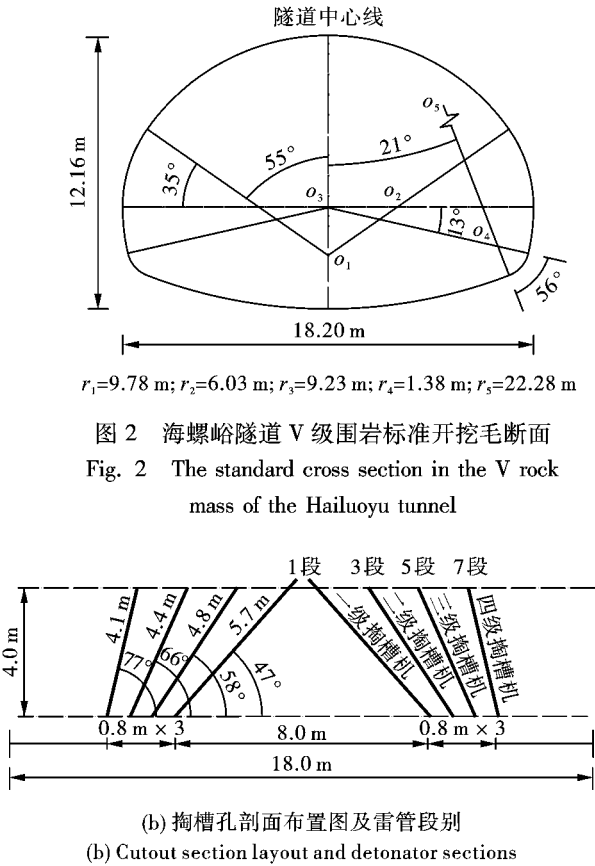
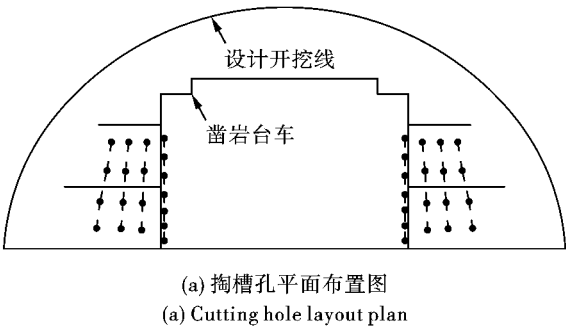


图 3 海螺峪隧道原掏槽爆破形式及炮孔参数

Fig. 3 The original cut blasting scheme and blasthole parameters of the Hailuoyu tunnel

表 1 隧道掏槽孔参数及装药量
Table 1 Tunnel cut blasting parameters and charge quantities

炮孔分类	段别/段	孔数/个	孔深/m	单孔装药量/kg	总药量/kg
掏槽孔	1	14	5.7	3.6	50.4
	3	8	4.8	3.3	26.4
	5	8	4.4	3.3	26.4
	7	8	4.1	3.0	24.0

2.2 存在问题分析

基于原掏槽爆破爆后效果分析,掌子面岩体破坏存在以下两点主要问题。

(1) 爆破后掌子面中底部存在根底。海螺峪隧道试验段围岩虽为 V 级围岩,但洞身岩性不一,存在上软下硬的岩体特征,其掌子面中底部岩体单轴抗压强度大于 30.0 MPa,导致原掏槽爆破后掌子面中底部存在一定范围的根底(即欠挖),范围分布高度 1.0~1.5 m,宽度 4.0~6.0 m,外凸厚度约 0.5 m,如图 4 所示。

(2) 爆破后存在大尺寸的块石。由于海螺峪隧道上台阶宽度为 18.0 m,一级主掏槽孔的炮孔孔口距约为 8.0 m,该楔形掏槽设计导致爆破开挖后产生大尺寸块石,选取一次典型的掘进开挖案例,其爆

后块石尺寸如图 5 所示,块石长度×宽度×高度约为 2.0 m×1.0 m×1.5 m。为满足现场出渣要求,需要对大尺寸块石进行二次钻孔及爆破,造成施工安全隐患,且影响掘进施工进度。

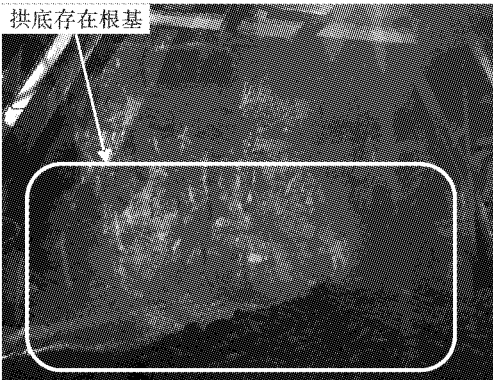


图 4 原掏槽爆破方案下爆后掌子面中底部欠挖
Fig. 4 Underbreak in the middle and bottom of the face after blasting excavation within the original cut blasting scheme

分析大断面上软下硬岩质隧道掏槽爆破存在欠挖和大块石的原因为:(1) 洞身岩性软硬不均,为上软下硬,掌子面中底部岩体多为中风化石灰岩;(2) 考虑 V 级围岩特征设计掏槽爆破参数,存在炮孔数量少,炮孔孔口距过大的问题;(3) 爆破进尺过大,

导致单孔装药量较多,造成单孔装药集中度过大;
(4)掌子面中底部上、下台阶交界处未设底孔。



图5 原掏槽爆破爆后大尺寸块石

Fig. 5 Large heavy stone after blasting excavation within the original cut blasting scheme

3 掏槽爆破优化及效果

隧道掏槽爆破欠挖和大块石,必然影响出渣施工作业的进度滞后及机械运转,同时对下一循环的钻孔布设造成影响。

基于试验段隧道原掏槽爆破效果及成因分析,通过现场试验,提出“四级复式楔形掏槽”的掏槽孔设计,增大掏槽腔体体积,同时解决爆破大块石的问题;

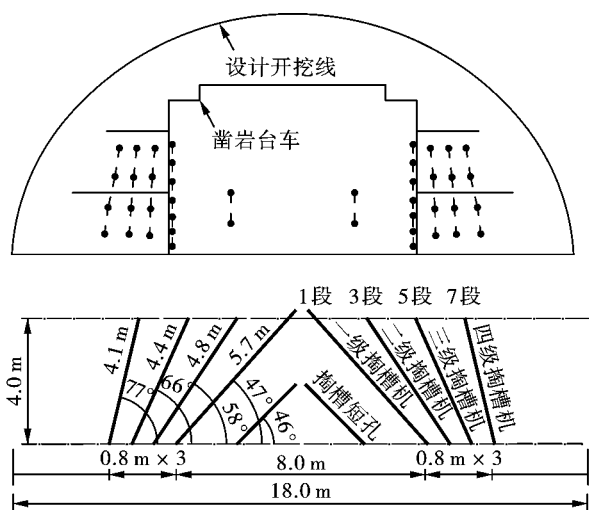
掌子面中底部增加底孔,协同掏槽孔爆破解决掌子面中底部欠挖的问题;减小掏槽孔最大单孔装药量,增加掏槽炮孔数量,使岩体破碎充分且降低爆破震动。

3.1 掏槽炮孔参数优化

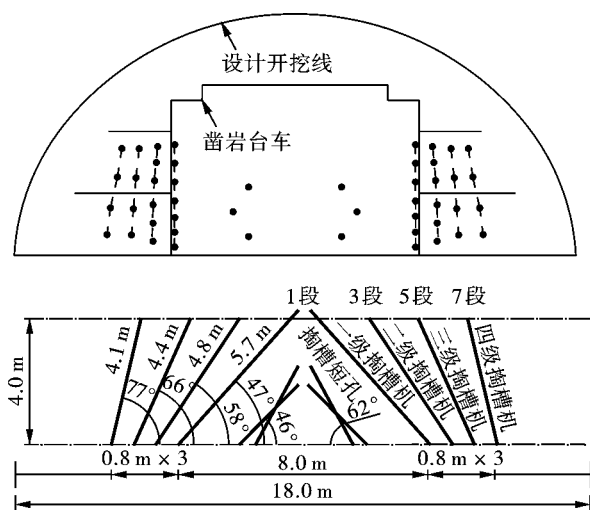
考虑到围岩的岩性不一,中风化石灰岩单轴抗压强度约为 50 MPa,中风化花岗岩单轴抗压强度约为 65 MPa,设计两种掏槽爆破方案。具体如下:

(1)掌子面围岩分布以中风化石灰岩为主,且岩体单轴抗压强度大于 30.0 MPa 时,掏槽形式为复式楔形掏槽,如图 6(a)所示。增设复式掏槽短孔 4 个,为二对、左右对称布置;其炮孔长度为 2.6 m,孔口距为 4.0 m,炮孔竖向间距为 1.0 m,与掌子面的夹角为 46° ,距上、下台阶交界面 1.0 m。

(2)掌子面围岩分布以中风化花岗岩为主,且岩体单轴抗压强度大于 45.0 MPa 时,掏槽形式为复式楔形掏槽,如图 6(b)所示。增设复式掏槽短孔 6 个,为三对、左右对称布置,其中二对炮孔长度为 2.7 m,孔口距为 3.0 m,与掌子面的夹角为 62° ;一对炮孔长度为 2.6 m,孔口距为 4.0 m,与掌子面的夹角为 46° ;其炮孔间距约为 0.9 m,距上、下台阶交界面 0.6 m。此外,增加二级掏槽孔 4 个,为二对、左右对称布置。



(a) 二对复式楔形掏槽短孔
(a) Two pairs of compound wedge cutting short holes



(b) 三对复式楔形掏槽短孔
(b) Three pairs of compound wedge cutting short holes

图6 掏槽孔优化布设形式及炮孔参数

Fig. 6 The optimized cut blasting scheme and blasthole parameters

3.2 增设底孔

图6中上台阶掌子面中底部存在欠挖的岩体根底,分析其原因之一是未设置底孔。因此,在掌子面中底部增设底孔 6 个,炮孔间距约为 1.5 m,炮孔长度为 4.0 m,竖向向下外插角为 3° 。

3.3 减少单孔装药量

参考相关文献的研究^[14-16],减小掏槽孔单孔装

药集中度,设置掏槽孔的单孔最大装药量为 2.7 kg,详细装药参数参见表 2、表 3,其中掏槽短孔的单孔装药量为 1.5 kg,底孔单孔装药量为 2.1 kg;四级二复式和三复式楔形掏槽总装药量分别为 121.2 和 124.2 kg。与优化前掏槽装药情况相比,优化后的整个掏槽腔体体积内炸药分布集中度减小、但分布范围更广。

表 2 四级二复式楔形掏槽参数及装药量
Table 2 Tunnel four-stage two-duplex wedge cut
blasting parameters and charge quantities

炮孔 分类	段别/ 段	孔数/ 个	孔深/ m	单孔药量/ kg	总药量/ kg
掏槽短孔	1	4	2.6	1.5	6.0
	1	14	5.7	2.7	37.8
掏槽孔	3	8	4.8	2.7	21.6
	5	8	4.4	2.7	21.6
	7	8	4.1	2.7	21.6
底孔	15	6	4.0	2.1	12.6

表 3 四级三复式楔形掏槽参数及装药量
Table 3 Tunnel four-stage three-duplex wedge cut
blasting parameters and charge quantities

炮孔 分类	段别/ 段	孔数/ 个	孔深/ m	单孔药量/ kg	总药量/ kg
掏槽短孔	1	6	2.6/2.7	1.5	9.0
掏槽孔	1	14	5.7	2.7	37.8
	3	12	4.8	2.4	28.8
	5	8	4.4	2.4	19.2
	7	8	4.1	2.1	16.8
底孔	15	6	4.0	2.1	12.6

3.4 优化爆后效果

采用上述掏槽爆破优化参数进行掘进开挖,提高了掏槽爆破开挖效果,表现为扩大了掏槽腔体体积,消除了掌子面中底部的欠挖,形成了平整的掌子面开挖面,如图 7 所示;最大掏槽块石尺寸大大减小,其最大尺寸约为 0.8 m × 0.5 m × 0.3 m (长度×宽度×高度),如图 8 所示;掌子面中底部开挖面平整、无欠挖,有利于机械运作、凿岩台架移动和下一循环的钻孔作业;最大块石尺寸减小避免二次爆破作业,提高了施工安全和出渣效率。

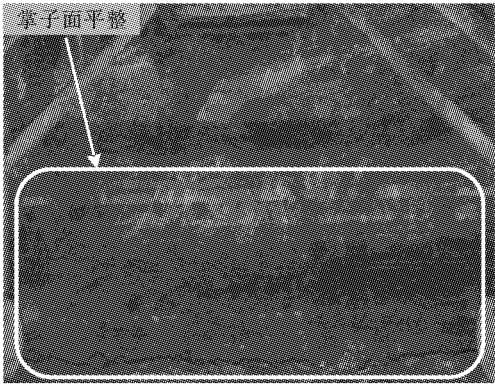


图 7 优化掏槽爆破方案下爆后掌子面中底部平整
Fig. 7 Flatness in the middle and bottom of the face after
balsting excavation within the optimized cut blasting scheme

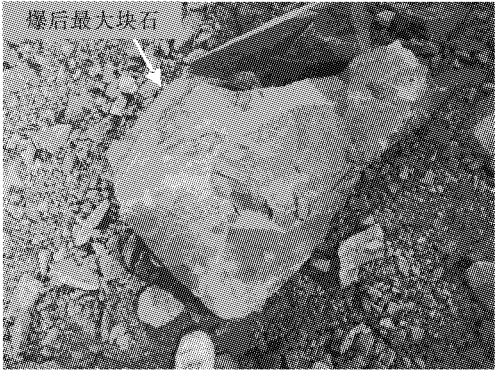


图 8 优化后爆后较小尺寸块石
Fig. 8 Smaller stone after balsting excavation
within the optimized cut blasting scheme

优化后,隧道开挖循环进尺平均为 3.71 m,炮孔利用率为 92.7%,炸药单耗约为 0.76 kg/m³;试验前,开挖循环进尺平均为 3.57 m,炮孔利用率为 89.3%,炸药单耗约为 0.79 kg/m³。

4 结论

- (1) 针对海螺峪隧道试验段掌子面上软下硬的岩体特性和原掏槽爆破方案下隧道掌子面中底部欠挖、产生大尺寸块石等工程问题,提出了“复式楔形掏槽”的多排掏槽孔设计、增加掏槽孔数量、减小掏槽孔最大单孔装药量和掌子面中底部增加底孔等措施,改善了掏槽爆破开挖效果。
- (2) 对于大断面岩质隧道,采用复式楔形掏槽设计,有利于减小炮孔孔口距、扩大掏槽腔体体积;通过增设底孔及设计一定外插角,形成掏槽孔与底孔的协同作用,有利于消除掌子面中底部的欠挖及形成平坦的底面。
- (3) 大断面岩质隧道中底部岩体完整性越好、围岩单轴抗压强度越强,则复式楔形掏槽设计应考虑增加掏槽短孔的数量、扩大掏槽装药分布范围和增加掏槽总装药量。

参考文献 (References)

[1] 邓 镔,杨伟超,张平. 软岩力学参数对薄基岩顶板隧道爆破围岩振动的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2019,47(8):23-30.

[1] DENG E, YANG Wei-chao, ZHANG Ping-ping. Influence of soft rock mechanics parameters on surrounding rock vibration during the tunnel blasting with thin bedrock roof[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(8): 23-30. (in Chinese)

[2] NAVARRO J, SANCHIDRIAN J A, SEGARRA P, et al. Detection of potential overbreak zones in tunnel blasting

- from MWD data[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82: 504-516.
- [3] 于飞飞, 张 娜, 张宪堂, 等. 水平层状岩隧道炮孔参数优化及爆破成形研究[J]. 爆破, 2019, 36(1): 63-69.
- [3] YU Fei-fei, ZHANG Na, ZHANG Xian-tang, et al. Blasting parameters optimization and blasting forming of horizontal layer rock tunnel[J]. Blasting, 2019, 36(1): 63-69. (in Chinese)
- [4] XIE L X, LU W B, ZHANG Q B, et al. Damage evolution mechanisms of rock in deep tunnels induced by cut blasting[J]. Tunnelling and underground space technology, 2016, 58: 257-270.
- [5] 胡建华, 杨 春, 周科平, 等. 单楔形掏槽爆破腔体时空演化及应用[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(12): 3309-3315.
- [5] HU Jian-hua, YANG Chun, ZHOU Ke-ping, et al. Temporal-spatial evolution and application of blasting cavity of single wedge cutting[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(12): 3309-3315. (in Chinese)
- [6] 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.
- [6] XIE Li-xiang, LU Wen-bo, JIANG Qing-hun, 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)
- [7] 高启栋, 卢文波, 冷振东, 等. 隧洞开挖过程中掏槽孔起爆位置的优选[J]. 振动与冲击, 2018, 37(9): 8-16.
- [7] GAO Qi-dong, LU Wen-bo, LENG Zhen-dong, et al. Optimization of cut-hole's detonating position in tunnel excavation[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(9): 8-16. (in Chinese)
- [8] YANG J H, JIANG Q H, ZHANG Q B, et al. Dynamic stress adjustment and rock damage during blasting excavation in a deep-buried circular tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 591-604.
- [9] 邹新宽, 潘 强, 王 微, 等. 隧道楔形分段掏槽爆破减震机理及试验研究[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(4): 186-192.
- [9] ZOU Xin-kuan, PAN Qiang, WANG Wei, et al. Experimental study of the vibration absorption mechanism of staged wedge-cut blasting technology[J]. Modern Tunneling Technology, 2017, 54(4): 186-192. (in Chinese)
- [10] 邹新宽, 张继春, 潘 强, 等. 楔形分段掏槽爆破减振效应研究[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(3): 450-458.
- [10] ZOU Xin-kuan, ZHANG Ji-chun, PAN Qiang, et al. Vibration reduction effect of stepped V-cut blasting[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(3): 450-458. (in Chinese)
- [11] 石洪超, 张继春. 并行小净距隧道楔形掏槽爆破振动效应研究[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(2): 607-613, 621.
- [11] SHI Hong-chao, ZHANG Ji-chun. Blasting vibration effect of wedge cut blasting in parallel small-distance tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2): 607-613, 621. (in Chinese)
- [12] 龚 敏, 陈 哲, 吴昊骏, 等. 掏槽药量与起爆时差的关系对隧道爆破合成振速的影响[J]. 应用基础与工程科学学报, 2016, 24(6): 1110-1124.
- [12] GONG Min, CHEN Zhe, WU Hao-jun, et al. Influence of correlation between cut blasting charge and detonating interval time on superposition vibration velocity caused by millisecond blasting in tunnel[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2016, 24(6): 1110-1124. (in Chinese)
- [13] 吉 凌, 周传波, 刘赶平, 等. 特大断面隧道倒 T 型掏槽爆破研究与应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(2): 54-60.
- [13] JI Ling, ZHOU Chun-bo, LIU Gan-ping, et al. Investigation and application of inverted T cut blasting for super-large cross section tunnel excavation[J]. Journal of Huazhong University of science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 48(2): 54-60. (in Chinese)
- [14] 何 闯, 王海亮. 优化爆破参数进行地铁车站隧道控制爆破[J]. 隧道建设, 2016, 36(1): 97-101.
- [14] HE Chuang, WANG Hai-liang. Optimization analysis on blasting parameters for blasting control of metro station tunnels[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(1): 97-101. (in Chinese)
- [15] 张万志. 岩质隧道炮孔图像识别算法及光面爆破参数优化研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- [15] ZHANG Wan-zhi. Research on blasthole image recognition algorithms and optimization of smooth blasting parameters of rock tunnel[D]. Jinan: Shandong University, 2019. (in Chinese)
- [16] 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.
- [16] XU Bang-shu, ZHANG Wan-zhi, SHI Wei-hang, et al. Experimental study of parameters of tunneling blasting in jointed layered rock mass[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2019, 48(6): 1248-1255. (in Chinese)