

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.011

双层周边孔护壁爆破在软弱破碎围岩的应用研究*

黄志强¹,崔正宇¹,刘 夺²,杨幸福²

(1. 沈阳工业大学 建筑与土木工程学院,沈阳 110870;2. 中交路桥北方工程有限公司,北京 100024)

摘要: 软弱破碎围岩在传统光面爆破施工中,容易出现超欠挖量难以控制、围岩损伤程度严重、半孔保存率低等一系列问题。以贵州小白岩隧道爆破施工为工程背景,研究了双层周边孔护壁爆破设计在软弱破碎围岩爆破工程中的应用。研究从分析超欠挖现象的形成原因出发,在周边孔炮孔布置、装药结构以及爆破顺序等方面进行了优化,将最外层的辅助孔装药结构调整与周边孔相同的不耦合装药,并在外层周边孔保留岩体的一侧添加护壁,爆破时先起爆外层周边孔再起爆内层周边孔。通过数值模拟及现场试验,确定了双层周边孔环向间距为 500 mm,径向间距为 650 mm,内外层起爆间隔为 50 ms。在应用双层周边孔护壁爆破设计后,现场试验段的超挖量与常规光面爆破相比减少了 40%~60%,半孔保存率提升至 89%,每循环进尺炸药使用量节约了 22 kg,经济效益显著提升,具有一定的推广应用价值。

关键词: 隧道爆破; 双层周边孔; 护壁; 软弱破碎围岩

中图分类号: U455.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)01-0075-08

Application of Casing Pipe Charge and Double-layer Perimeter Holes on Controlled Contour Blasting in Soft Fractured Surrounding Rock

HUANG Zhi-qiang¹, CUI Zheng-yu¹, LIU Duo², YANG Xing-fu²

(1. College of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. China Jiaotong Road and Bridge North Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China)

Abstract: In traditional smooth blasting construction, soft cracked surrounding rock is prone to a series problems, such as difficulty to control the amount of overcutting and undercutting, serious damage of surrounding rock, and low half-hole preservation rate. Based on the blasting construction of Xiaobaiyan tunnel in Guizhou Province, a casing pipe charge blasting design with double-layer perimeter holes was designed for soft fractured surrounding rock. In this study, starting from the causes of overbreak and underbreak, the perimeter hole layout, charge structure and blasting sequence were optimized. The charge structure of the outermost auxiliary holes was adjusted to the same uncoupled charge as that of the perimeter holes, and a protection casing pipe was added to the side of the reserved rock mass in each perimeter hole. The perimeter holes in were designed to initiate first and then followed by the inner layers of holes. Through numerical simulation and field tests, it is determined that the circumferential spacing of the double-layer perimeter holes is 500 mm, and the radial spacing is 650 mm. The initiation delay interval of the inner and outer layers is 50 ms. After applying the presented blasting design, the amount of over-excavation in the field test section has been reduced by 40% to 60% compared with conventional smooth blasting, and the half-hole preservation rate has increased to 89%. Finally, 22 kg explosive consumption is saved per cycle advance and the economic benefit is significantly improved, which has a good popularization and application value.

Key words: tunnel blasting; double-layer perimeter hole; casing pipe; soft broken surrounding rock

目前,光面爆破在山岭隧道开挖中得到了广泛应用,但在实际隧道开挖过程中,由于隧道受力特性复杂,爆破效果难以控制,经常会出现超欠挖等不良工况。隧道超欠挖首先会影响隧道围岩稳定性,欠挖部分需要进行二次爆破,这样会对围岩产生爆破震动,扩大隧道围岩松动圈范围,引起坍塌、失稳等工程事故,不利于施工安全;而超挖严重不仅对洞室结构稳定形成不利影响,还容易造成隧道内出渣时间比较长,施工人员施作支护结构周期延长,使工程的材料成本和人员成本增加,导致工程造价的提高。

对于隧道爆破的超欠挖问题,目前已有学者从爆破理论、技术等方面提出了一系列优化措施。国外学者在20世纪60~70年代就开始岩体爆破效果的研究,Rinehart 针对应力波在一般岩体中的传播过程和规律进行了研究^[1],认为岩体节理、裂隙对应力波传播影响较大。张志呈等为减少超欠挖^[2-4],降低爆破对孔壁岩石的损伤,提出了光面护壁爆破的技术,并分析了不同种类的护壁形式和作用原理,通过模型试验以及巷道爆破施工验证了其爆破效果。杨玉银、陈长贵等在卡鲁玛水电站尾水隧道施工中提出了“微量装药软岩光面爆破技术”的概念^[5],针对极软岩的开挖采用了双层光面爆破的方法,取得了良好的效果。李启月等针对IV级围岩爆破后超挖严重的情况^[6],从围岩损伤的角度进行了分析,优化了光爆层厚度、装药结构、起爆顺序等爆破参数,并通过现场试验验证了优化的可行性^[7-20]。

上述研究运用不同方法有效控制了光面爆破的超欠挖问题,但并未形成完整的周边孔爆破方案,本

课题以小白岩隧道为工程背景,综合以上研究进行一系列优化,提出了双层周边孔护壁爆破技术,通过数值模拟和现场爆破试验验证了该方案的有效性,为类似工程提供参考。

1 依托工程概况

小白岩隧道位于贵州省石阡至玉屏高速公路第TJ07标段(K46+250~K53+473.573),属于双洞分离式隧道,隧址区地貌起伏较大,且不同程度穿越了断层破碎带、岩溶区等不良地质区域。隧道左洞IV级、V级围岩比例为76.6%,右洞IV级、V级围岩比例为73.8%,其中V级围岩的破碎程度最为严重,隧道断面积为98.65 m²,在爆破开挖施工过程中断面轮廓超、欠挖现象比较严重,对洞室岩体自身结构稳定性造成极为不利影响,而且还会带来巨大的经济损失。

2 双层周边孔护壁爆破设计研究

本研究选取YK49+955-YK50+030标段为试验段,该标段属于V级围岩,围岩主要为中风化炭质页岩及变余砂岩,薄-中厚层状构造,岩体极破碎,拱部及两侧壁自稳性差,开挖时易发生滑塌。图1为V级围岩中原爆破方案的炮孔布置图,根据图1的炮孔布置图可知,由于隧道断面面积较大,原爆破方案中炮孔数达222个,每循环炸药使用量较大,爆破过程中产生的应力波和爆生气体会破坏围岩的应力平衡,从而使岩体内部应力重分布或发生局部应力集中。当局部应力大于围岩强度,很容易造成岩体内部破坏,影响隧道洞室结构的稳定性。

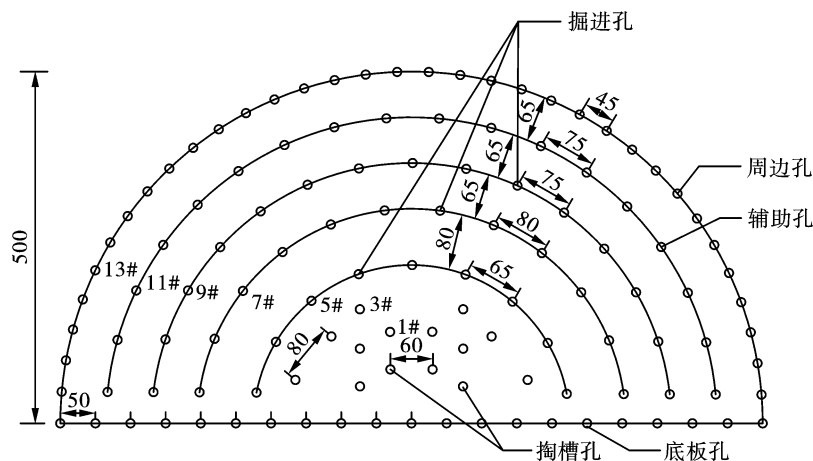


图1 上台阶光面爆破炮孔布置图(单位:cm)

Fig. 1 Layout diagram of blasting holes upper steps(unit:cm)

收稿日期:2021-09-08

作者简介:黄志强(1971-),男,教授、博士,主要从事地下与岩土工程方向研究,(E-mail)h_zhq@qq.com。

通讯作者:崔正宇(1997-),男,硕士研究生,主要从事桥梁与隧道工程研究,(E-mail)3085103975@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金(42007241)

为了解决超欠挖问题,减小爆破振动对围岩松动圈的影响,施工设计中设置了双层周边孔,在外层周边孔保留岩体一侧添加了护壁管,并且调整了周边孔的爆破顺序。研究中通过理论分析、数值模拟

等方法来优化爆破参数,并结合现场的监测数据进行验证。

2.1 炮孔布置优化

由文献[6]可知,实际爆破开挖施工中,最外层辅助孔要先于周边孔起爆,而且装药量大于周边孔,辅助孔产生的应力波经叠加反射之后使岩体的裂纹扩展并产生新的裂纹,因此光爆层的岩体性质已经发生改变。由豪柔公式可知,光爆层厚度为^[6]

$$W_b = \frac{q_b}{cEl_b} \quad (1)$$

式中: q_b 为单孔装药量; l_b 为孔深; c 为单位体积的炸药消耗量,设计中只考虑单层孔作用而忽略了二圈孔的损伤影响。实际爆破中周边孔起爆前光爆层已经受到损伤破坏,即使周边孔采取了不耦合装药超挖情况仍然难以控制,这种损伤效应在软弱破碎围岩中尤为严重。

根据以上研究,为了有效控制超挖量,减小最外层辅助孔对光爆层的损伤破坏,应适当降低外层辅助孔的装药量。研究中将图 1 中的 11#炮孔调整为与 13#炮孔相同的装药结构,形成了双层周边孔,这样可以防止内层周边孔单孔装药量过大使裂纹贯穿光爆层,从而减小对岩壁的损伤。

2.2 装药结构优化

双层周边孔的装药结构均为不耦合装药,由于装药量的减少,轮廓处的爆生气体和应力波作用会显著下降,容易造成欠挖情况出现,对于欠挖部分需要进行二次爆破,对围岩的损伤更加难以控制。研究中最外层周边孔设置了护壁管,添加护壁之后只有少部分爆破冲击波能够穿透护壁管和空气介质的双重阻隔,然后作用于岩壁上,大部分会在护壁管的反射作用下集中在抛掷岩体一侧,在减少超挖的同时也杜绝了欠挖情况的发生。

图 2 为双层周边孔护壁爆破示意图,周边孔引爆时先起爆外层周边孔,在护壁管的作用下应力波会向临空面一侧集中传播,并与内层周边孔爆破后的应力波产生叠加效应,从而提升爆破威力。另外,外层周边孔起爆后爆生气体由于护壁管的阻隔作用,在护壁管边缘处形成了“气楔”作用,爆生气体在岩壁上产生张拉应力使围岩产生裂缝,当外层周边孔同时起爆完成后就能使裂缝贯通,形成基本的隧道轮廓线。

双层周边孔的装药结构如图 3 和图 4 所示,内外层周边孔均为空气间隔不耦合装药,而外层周边孔则在保留围岩的一侧设置护壁管,将护壁管与药卷绑扎在一起,并用定位卡环固定护壁的方向,最大

程度地减小围岩损伤。

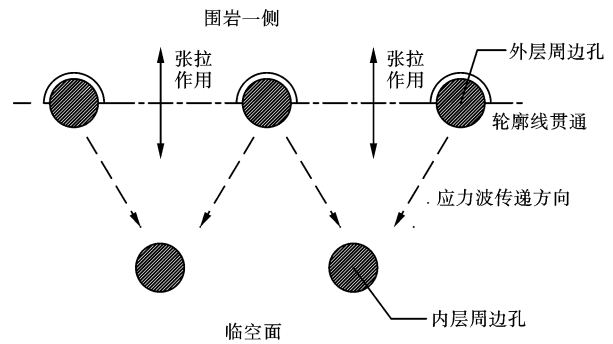


图 2 双层周边孔护壁爆破力学模型

Fig. 2 Blasting mechanical model of double-layer perimeter hole and casing pipe

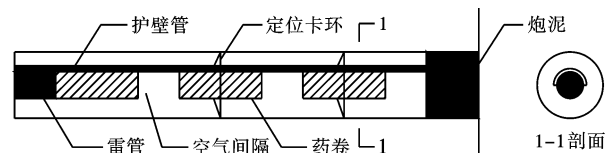


图 3 外层周边孔装药结构示意图

Fig. 3 Chart of charge structure of outer perimeter hole

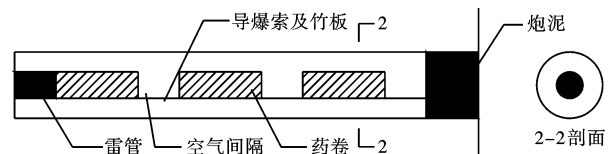


图 4 内层周边孔装药结构示意图

Fig. 4 Chart of charge structure of inner perimeter hole

2.3 起爆顺序优化

原爆破方案中爆破施工的起爆顺序为:掏槽孔→掘进孔→辅助孔→底板孔→周边孔,每层炮孔的起爆时间间隔为 100 ms。调整之后周边孔的起爆顺序细化为:外层周边孔→内层周边孔,先起爆外层周边孔,在护壁作用下使爆破冲击波定向传播,延隧道轮廓线使裂缝贯通,再起爆内层周边孔形成完整的隧道断面,整体上具有预裂爆破的效果。为了增强应力波的叠加效应,内外层周边孔起爆的时间间隔缩短为 50 ms,在保证爆破质量的基础上控制超欠挖情况的发生,图 5 为双层周边孔的整体布置示意图。

3 数值模拟研究

3.1 护壁爆破数值模拟

护壁爆破是指为保护设计轮廓线外的岩体,爆破时在炮孔内额外添加一层或多层具有一定强度和密度的护壁管的爆破技术。施工中在外层的周边孔设置了单层护壁,通过岩体护壁爆破机理分析和数

值模拟,开展相关研究。

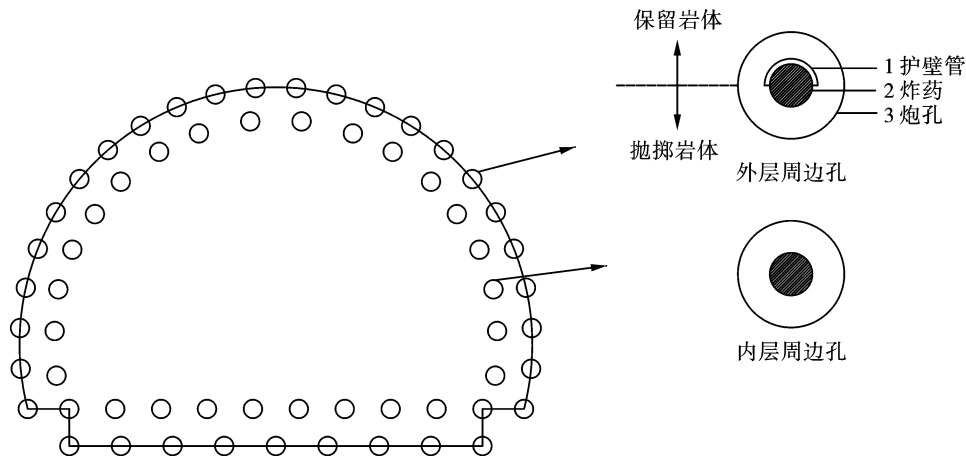


图5 双层周边孔布置图

Fig. 5 Layout of double-layer perimeter Holes

如图6所示,在抛掷岩体的一侧由于没有护壁管的保护作用,爆破冲击波可直接作用于岩体,其作用效果相当于普通光面爆破,在保留岩体一侧爆轰波需要穿透护壁和空气的双重阻隔,对保留岩体一侧炮孔内壁的破坏程度有所减小,因此能达到保护保留岩体的目的。

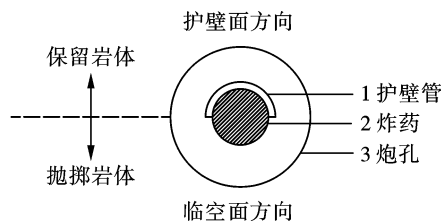


图6 光面护壁爆破示意图

Fig. 6 Schematic diagram of casing pipe smooth blasting

为验证护壁爆破中护壁管对岩体的保护效果,运用 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件建立护壁爆破模型,计算中主要采用 Lagrange 和 ALE 算法。如图7所示,模型中炮孔孔径 40 mm、药柱直径 32 mm,堵塞长度 5 cm、药柱长度 3 cm,在保留岩体侧炮孔内添加了护壁管,光面护壁爆破的护壁方式为炮孔内壁与护壁管耦合,护壁材料 PVC 管厚 2 mm;为模拟岩体无限边界,模型左右两侧和后方均设置为无反射边界,采用药柱中心起爆的方式。

研究中在保留岩体一侧和抛掷岩体一侧选取两个质点,测定其在爆破过程中应力变化特征,如下图7。药柱起爆之后, a 点和 b 点所受压力同时增大,爆破抛掷岩体一侧压力峰值出现在爆破后 37.7 μs ,其最大值为 557.64 MPa,保留岩体一侧压力峰值出现在爆破后 41.2 μs ,其最大值为 349.12 MPa

(图8),保留岩体一侧压力降低 37.39%,由于护壁管的阻隔峰值起始时间滞后 3.5 μs 。

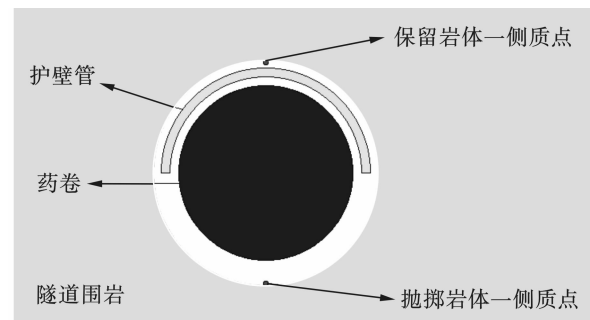


图7 质点位置

Fig. 7 Particle position

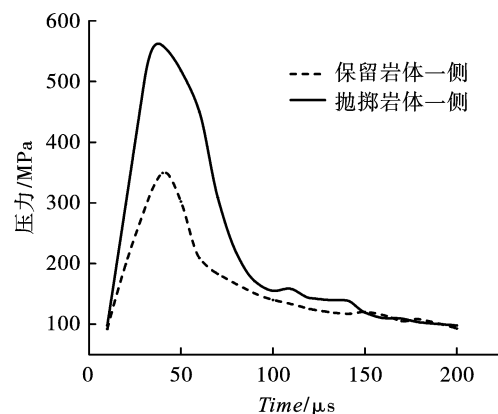


图8 压力时程曲线

Fig. 8 Pressure time interval curve

通过模拟结果可知,护壁爆破相对于光面爆破,由于护壁管的存在,有利于降低爆炸能量对保留岩体的破坏,同时也有利于将更多能量用于破碎抛掷岩体,达到既保护保留岩体、又充分利用能量破坏抛

掷岩体的目的。

3.2 双层周边孔间距研究

如图 9 所示,取双层周边孔一部分作为研究对象,设环向间距为 d ,径向间距为 s ,外层周边孔取两个,内层周边孔取一个,形成一个三角形结构。在原设计方案中周边孔间距为 450 mm,最外层辅助孔与周边孔的径向间距为 650 mm,研究中运用 ANSYS/LS-DYNA 建立有限元模型,以超欠挖量衡量环向间距 d 的最佳值,以三角形结构的中心单元所受应力峰值来确定径向间距 s 的最佳值,模拟爆破时先引爆外层周边孔,再引爆内层周边孔,时间间隔为 50 ms,通过有限元模拟为现场掌子面炮孔的布置提供参考依据。

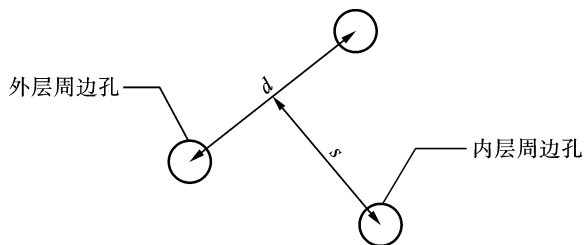


图 9 双层周边孔位置示意图

Fig. 9 Position diagram of double-layer perimeter hole

在原设计方案中环向间距 d 为 450 mm,研究中将 d 从 400 mm 到 600 mm 逐渐递增,每次间距增大 10 mm,经过数值模拟之后超欠挖量的变化曲线如图 10 所示,当环向间距 d 为 500 mm 时,超欠挖量接近于 0,爆破效果达到最佳,因此现场双层周边孔的环向间距选择 500 mm。

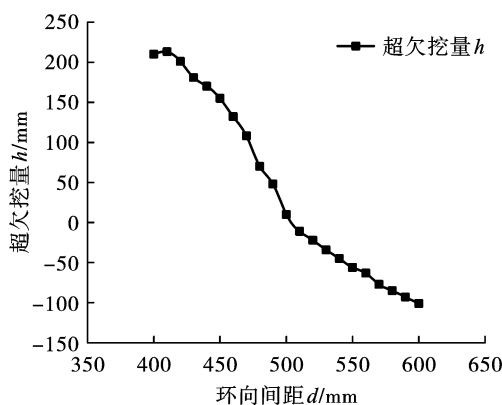


图 10 环向间距对超欠挖影响曲线

Fig. 10 Influence curve of circumferential spacing on over-under-excavation

而对于径向间距 s ,原设计方案中为 650 mm,研究中将 s 从 500 mm 到 700 mm 进行递增,每次变化量为 20 mm,如图 9 中三炮孔形成的三角形结构,取

其中心单元监测爆破过程中受到的应力峰值,比较后确定最佳径向间距。由下图 11 可知,当径向间距为 640 mm 时,中心单元的应力峰值达到最大为 1093 MPa,但考虑到原设计方案中径向间距为 650 mm,现场钻孔时 640 mm 的间距难以控制,因此双层周边孔的径向间距仍保持 650 mm。

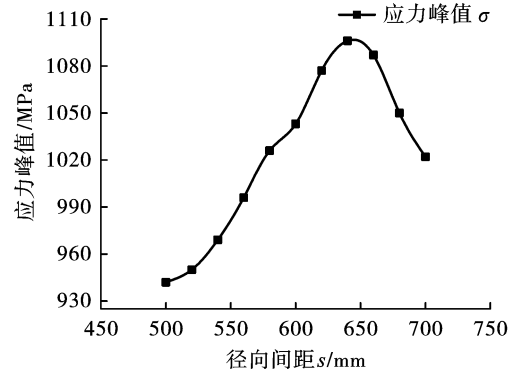


图 11 径向间距对应力峰值影响曲线

Fig. 11 Influence curve of radial spacing on peak stress

4 现场爆破效果分析

施工中在试验段先进行两个循环的双层周边孔护壁爆破开挖,然后选取隧道开挖断面进行监测,检验隧道开挖情况是否符合设计。表 1 为双层周边孔护壁爆破参数表。

表 1 双层周边孔护壁爆破参数

Table 1 Blasting parameters of double-layer perimeter holes

炮眼种类	炮眼个数	炮孔深度/m	装药量/kg		联线方式
			单孔	小计	
掏槽眼	14	1.5	1.2	16.8	大
掘进眼	48	1.5	1.2	57.6	
辅助眼	20	1.3	0.9	18.0	
底板眼	32	1.3	0.9	28.8	串
周边眼	98	1.3	0.5	49.0	
合计	212	—	—	170.2	联

对于本案例中的 V 级围岩标段,选取右线 YK49 + 980 断面与左线 ZK49 + 980 断面进行对比,两断面的地质情况基本相同,其中右线采用了双层周边孔 + 护壁的布孔形式,而左线则为原布孔方案,开挖轮廓线示意图如图 12 所示,左右线隧道断面的设计半径均为 6.23 m,在隧道轮廓周边布设 15 个测点,检测开挖断面的超欠挖量。

如下两表所示,表 2 为左线开挖断面检测结果,表 3 为右线的检测结果,原设计断面中隧道的轮廓半径为 6.23 m,而在实际的爆破开挖中,软弱破碎围岩均存在不同程度的超挖情况。将两断面的超挖

量对比可知,采用双层周边孔爆破后超挖量明显减小,左线隧道最大超挖为29 cm(8#),而右线隧道最大超挖减小为17 cm(7#),减小了41.3%,欠挖现象基本杜绝,而超挖状况也得到了明显改善,其中超挖的部位主要集中在拱顶处,因此在现场开挖中应注意拱顶部位的加固和支护。

现场试验断面爆破完成后,施工中最小抵抗线由60 cm增大为80 cm,炮孔数量也减少了10个。根据考虑到工程的经济性指标,将最外层辅助孔的装药结构调整为周边孔后,每个炮孔的炸药使用量由1.01 kg减少为0.98 kg,整个断面每循环进尺炸药使用量减少了22 kg,降低了爆破施工成本。

常规光面爆破与双层周边眼光面爆破的爆破效果对比列于表4。

常规光面爆破与双层周边眼光面爆破耗材对比

见表5。

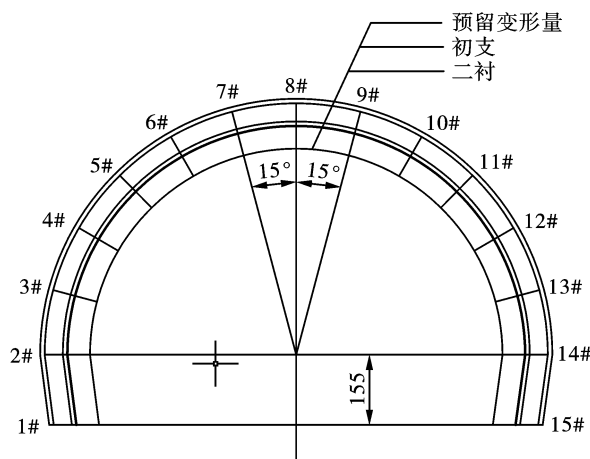


图12 开挖轮廓监测示意图(单位:cm)

Fig. 12 Excavation contour monitoring schematic(unit:cm)

表2 ZK49+980断面检测结果(单位:m)

Table 2 ZK49+980 Section detection results(unit:m)

测点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
设计	—	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	—
实测	—	6.48	6.45	6.50	6.51	6.44	6.52	6.45	6.49	6.50	6.49	6.45	6.46	6.45	—
误差	—	0.25	0.22	0.27	0.28	0.21	0.29	0.22	0.26	0.27	0.26	0.22	0.23	0.22	—

表3 YK49+980断面检测结果(单位:m)

Table 3 YK49+980 Section detection results(unit:m)

测点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
设计	—	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	6.23	—
实测	—	6.40	6.39	6.38	6.39	6.40	6.41	6.38	6.39	6.39	6.38	6.40	6.40	6.39	—
误差	—	0.17	0.16	0.15	0.16	0.17	0.17	0.15	0.16	0.16	0.15	0.17	0.17	0.16	—

表4 爆破效果对比

Table 4 Comparison of blasting effect

爆破类型	炸药使用量/kg	最大超挖量/m	爆速/(cm·s ⁻¹)	爆堆长度/m	爆堆高度/m	半孔率/%
常规光面爆破	192	0.29	4.1	24	1.6	72
双层周边眼光面爆破	170	0.17	3.9	20	1.8	89

表5 每循环耗材对比分析

Table 5 Comparative analysis of consumables per cycle

项目名称	常规光面爆破	双层周边眼光面爆破	节超	节超百分比/%
循环进尺/m	1.2	1.5	0.3	25
炮眼个数	222	212	-10	-4.5
炸药/(kg·m ⁻¹)	42.15	33.20	-8.95	-21.00
雷管/(发·m ⁻¹)	40.0	25.0	-15.0	-37.5
护壁管/(m·m ⁻¹)	0	55.5	55.5	100.0
喷浆料/(m ³ ·m ⁻¹)	3.52	2.16	-1.36	-38.60

注:总价“-”为节,“+”为超。

由表4和表5可知,与常规光面爆破相比,采用双层周边孔护壁爆破后隧道每循环施工的耗材量明

显减少,整体的施工成本有所下降。最大超挖量减小了41.3%,爆破后的抛石距离较之前更为集中,

有利于出渣,加快了施工进度,而且在最外层周边眼设置了护壁,根据监测结果,围岩松动圈显著减小,爆破后周边围岩的稳定性有所提高,提升了工程的安全系数。

图13和图14为双层周边孔护壁爆破后的现场照片。



图13 现场爆堆图片

Fig. 13 Field explosion pictures



图14 隧道拱肩炮痕

Fig. 14 Blast marks on tunnel arch shoulder

5 结论

(1) 双层周边孔护壁爆破是将内外层周边孔都设置为不耦合装药,并在外层周边孔靠近围岩的一侧添加护壁,经模拟计算后周边孔环向间距为500 mm,径向间距为650 mm,周边孔爆破时先引爆外层周边孔再引爆内层周边孔,时间间隔为50 ms。

(2) 经现场试验段爆破试验后,超挖量均控制在20 cm以内,较常规光面爆破减小40%~60%,炸药使用量节约了21%,经济效益显著,可以在类似工程中借鉴应用。

参考文献 (References)

- [1] RINEHART J S. Effects of transient waves in rocks[J]. Mining Research, 1962, 2: 731-726.
- [2] 蒲传金,肖正学,张志呈,等. 护壁爆破新技术[J]. 中国工程科学, 2009, 11(8): 88-92.
- [2] PU C J, XAO Z X, ZHANG Z C. New technology of double-pipe protecting borehole wall blasting[J]. Engineering Sciences, 2009, 11(8): 88-92. (in Chinese)
- [3] 郭学彬,张志呈,蒲传金,等. 护壁爆破的基本原理与爆破效果的声波评价[J]. 爆破, 2006(4): 9-14.
- [3] GUO X B, ZHANG Z C, PU C J. Principle of double-pipe protecting borehole wall blasting and sonic wave evaluation of blasting effect[J]. Blasting, 2006(4): 9-14. (in Chinese)
- [4] 张志呈,肖正学,张志恒,等. 护壁爆破在煤矿巷道掘进中的应用[J]. 煤矿爆破, 2009(4): 31-33.
- [4] ZHANG Z C, XAO Z X, ZHANG Z H. Application of protecting borehole wall blasting technology in roadway excavation[J]. Coal Mine Blasting, 2009(4): 31-33. (in Chinese)
- [5] 杨玉银,陈长贵,黄 浩,等. 微量装药软岩光面爆破技术[J]. 爆破, 2015, 32(4): 77-83, 88.
- [5] YANG Y Y, CHEN C G, HUANG H. Soft rock smooth blasting technique of micro-charging[J]. Blasting, 2015, 32(4): 77-83, 88. (in Chinese)
- [6] 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.
- [6] LI Q Y, WEI X A, ZHENG J. 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)
- [7] 周 涵,孙从煌,曲 艳,等. 小断面长陡斜坡隧道短导洞光面爆破技术研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(2): 228-237.
- [7] ZHOU H, SUN C H, QU Y. On smooth blasting technology assisted with short heading cut blasting for tunnels with small sections and long steep slopes[J]. Modern Tunneling Technology, 2021, 58(2): 228-237. (in Chinese)
- [8] 秦晓星. 大断面裂隙岩体高铁隧道光面爆破技术研究[D]. 绵阳:西南科技大学, 2020.
- [8] QIN X X. Study on smooth blasting technology of high-speed railway tunnel with large fracture rock mass[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [9] 梁东彪. 周边孔爆破参数对隧道围岩损伤及超欠挖的影响研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
- [9] LIANG D B. Study on influence of periphery hole blasting parameters on surrounding rock damage and overbreak and underbreak of tunnel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019. (in Chinese)
- [10] 桑运龙,何国华,孙 州,等. 爆破振动对隧道不同级

- 别围岩松动范围影响分析[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(S2):291-298.
- [10] SANG Y L, HE G H, SUN Z. Analysis of the influence of blasting vibration on the loose range of surrounding rocks with different grades in a road tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(S2):291-298. (in Chinese)
- [11] 胡子建, 周勇, 朱建群, 等. 隧道开挖过程中软弱围岩的爆破技术研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2012, 29(3):73-76.
- [11] HU Z J, ZHOU Y, ZHU J Q. Research on blasting technique of soft rock in the process of excavating tunnel[J]. Journal of Hebei University of Engineering(Natural Science Edition), 2012, 29(3):73-76. (in Chinese)
- [12] 杨跃宗, 邵珠山, 熊小锋, 等. 岩石爆破中径向和轴向不耦合装药的对比分析[J]. 爆破, 2018, 35(4):26-33, 146.
- [12] YANG Y Z, SHAO Z S, XIONG S F. Comparison of radial and axial uncoupled charge in rock blasting[J]. Blasting, 2018, 35(4):26-33, 146. (in Chinese)
- [13] 唐海, 李海波, 周青春, 等. 预裂爆破震动效应试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11):2277-2284.
- [13] TANG H, LI H B, ZHOU Q C. Experimental study of vibration effect of presplit blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11):2277-2284. (in Chinese)
- [14] 谢文强, 常志祥, 刘亚东, 等. 多楔形掏槽聚能水压力光面爆破技术优化[J]. 能源与环保, 2018, 40(5):198-203, 207.
- [14] XIE W Q, CHANG Z X, LIU Y D. Optimization of multi wedge cutting and shaped water pressure smooth blasting technology[J]. China Energy and Environmental Protection, 2018, 40(5):198-203, 207. (in Chinese)
- [15] SEONG-SEUNG Kang, HYONGDOO Jang. A case study on tunnel blasting design evaluation considering blast damage zone[J]. Science and Technology of Energetic Materials, 2020, 81(4):106-113.
- [16] NGUYEN Ngoc MINH, CAO P, LIU Z Z. Contour blasting parameters by using a tunnel blast design mode[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(1):100-111.
- [17] 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.
- [17] MA C D, LIU Z L, ZHENG J. Application of blasting techniques with the reserved smooth blasting layer in full-face construction of large and long tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56(6):173-180. (in Chinese)
- [18] 朱永学, 王丙坤, 谢丰泽, 等. 上软下硬岩体大断面隧道掏槽爆破技术优化[J]. 爆破, 2020, 37(4):53-58.
- [18] ZHU Y X, WANG B K, XIE F Z. Optimization of cutting blasting technology for large cross-section tunnel in upper soft and lower hard rock mass[J]. Blasting, 2020, 37(4):53-58. (in Chinese)
- [19] MAN K, LIU X L, SONG Z F, et al. Frequency spectrum and wavelet packet analyses of blasting vibration signals for different charge structures in blasting perimeter holes[J]. Advances in Civil Engineering, 2020(2):1-11.
- [20] 杨建辉, 胡东荣, 朱晨鸿, 等. 周边眼聚能爆破参数数值模拟研究[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1):187-192.
- [20] YANG J H, HU D R, ZHU C H. Study on numerical simulation on shaped charge blasting parameters of perimeter holes[J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(1):187-192. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

《爆破》论文网络首发及著作权使用声明

《爆破》为使录用论文首发权及时获得确认,自2019年12月起与中国知网合作启动“网络首发”在线优先数字出版项目,即《中国学术期刊(网络版)》(简称CAJ-N),统一连续出版物号ISSN 2096-418、CN 11-6037/Z。

作者稿件经审稿录用后,将会以“录用定稿”模式第一时间上传至中国知网“网络首发”平台发布。每篇网络首发论文均可下载一份“中国知网学术期刊网络首发论文出版证书”,其效力等同于纸质出版论文。

为避免出现一稿多投的现象,凡已投《爆破》的稿件,在未确认录用或退稿前,请勿再投他刊!

《爆破》为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中国期刊网》、《中国学术期刊(光盘版)》、《中文科技期刊数据库》、“万方数据——数字化期刊群”、维普网和超星学术期刊“域出版”平台收录期刊。本刊已许可上述机构以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。所有署名作者向本刊提交文章发表之行为视为同意上述声明。如有异议,请在投稿时说明,本刊将按作者说明处理。