

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.011

# 水垫封光面爆破技术在龙那1号隧道中的应用研究\*

李继业<sup>1</sup>,张剑兴<sup>1</sup>,何兴贵<sup>2</sup>

(1. 中交一公局第四工程有限公司,南宁 530003;2. 贵州新联爆破工程集团有限公司,贵阳 550002)

**摘要:** 为解决龙那1号隧道掘进过程中存在的爆破效果差、超挖现象凸显、围岩稳定性得不到保证的问题;利用水垫封光面爆破技术,进行参数优化实验。实验结果表明:当底部水袋高度在10~25 cm之间,顶部水袋高度在20~35 cm之间,水袋总高度在30~70 cm之间时;随着底部水袋高度和水袋总高度的增加,半孔率总体逐渐减小,炮孔利用率总体降低,爆破块度呈增大趋势;随着水袋总高度的增加,通风时间先增大后减小。利用优化实验结果(底部水袋高度为15 cm,顶部水袋高度为25 cm),对比常规光面爆破进行分析,半孔率提高了8.7%,炮孔平均利用率增大10.1%,通风时间减少8.4 min,进尺增大0.32 m,爆破最大块度减小8 cm,该项技术应用于龙那1号隧道中取得了良好的效果。

**关键词:** 隧道掘进;水垫封光面爆破;参数优化;水袋高度

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2020)01-0078-08

## Application of Smooth blasting of Water Cushioning and Sealing Technology in Tunnel No. 1

LI Ji-ye<sup>1</sup>, ZHANG Jian-xing<sup>1</sup>, HE Xing-gui<sup>2</sup>

(1. The Fourth Engineering Co Ltd of CCCC First Highway Engineering Co Ltd, Nanning 530003, China;  
2. Guizhou Xianlian Blasting Engineer Limited Co Ltd, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of poor blasting effect, over-excavation and unstable surrounding rock during the excavation of Longna No. 1 tunnel, The parameter optimization experiment is carried out by using the smooth blasting of water cushioning and sealing technology. The experimental results show that when the height of the bottom water bag is between 10cm~25cm, the height of the top water bag is between 20cm~35cm, and the total height of the water bag is between 30cm~70cm, with the increase of the height of the bottom water bag and the total height of the water bag, the ratio of the half hole is gradually reduced, the utilization rate of the hole is reduced, the blasting block degree is increasing, and the ventilation time increases with the increase of the total water bag height. After large, decrease. By optimizing the experimental results (the height of the bottom water bag is 15cm, the height of the top water bag is 25cm), the ratio of the half hole is increased by 8.7%, the average utilization rate of the hole is increased by 10.1%, the ventilation time is reduced by 8.4min, the scale is increased by 0.32m, and the maximum block degree of blasting is reduced by 8cm. This technique is applied to Tunnel No. 1 of Long Na. It has achieved good results and can provide reference for other similar projects.

**Key words:** tunneling; smooth blasting of water cushioning and sealing; Parameter optimization; The height of water bag

## 0 引言

隧道在爆破开挖过程中,爆破效果、爆破粉尘、进尺、半孔率、炮孔利用率、超欠挖、围岩稳定性是决定工程施工的经济性、安全性和合理性的重要因素;采取一定措施有效控制以上因素,对爆破施工要求和爆破技术发展具有重要意义。龙勇使用光面护壁爆破技术,有效减少了围岩的扰动和破坏,取得了良好的光面爆破效果[1]。罗志光[2]采用固液气三相爆破技术,使半孔残留率到达95%左右。刘坚[3]、李海港[4]、刘海波[5]、王振江[6]等人利用水压爆破技术,实现隧道爆破开挖成本低、掘进速度快和防尘减震效果好。水垫封光面爆破的使用具有很好的降尘作用,装入的水量越多,其降尘效果越佳;但是,不同的底部和顶部的水袋装入量却影响着单次进尺、爆破效果和围岩的平整度,因此确定底部和顶部水袋的填塞高度尤为重要;结合龙那1号隧道,利用水垫封光面爆破技术,通过优化实验综合分析选择合理的参数进行施工,解决爆破施工中存在的问题,为其他类似工程提供借鉴。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

龙那1号隧道进口位于广西天等县福新乡隆昌屯北西侧,出口位于广西天等县福新乡龙郡屯东南侧,隧道设计分为左线和右线,分离式越岭隧道,属长隧道。隧道区属丘陵及峰林地貌,地面线呈波状起伏。峰林大致呈东西向延展,隧道岩层以石灰岩为主,围岩级别有Ⅲ、Ⅳ级,隧道区岩溶发育一般,属岩溶弱发育区,部分地段存在岩溶问题。隧道区山体及山脚未发现地表水体,根据现地质调查,石灰岩较深部位中赋存有裂隙水和岩溶水,裂隙水主要是大气降水时沿岩石的风化裂隙下渗;岩溶水主要赋存于石灰岩的溶隙及溶洞中,主要受大气降水及地表水补给。

### 1.2 存在问题

采用常规的装药结构进行光面爆破时,隧道断面完整性较差,超欠挖现象凸显(见图1);存在围岩

径向裂缝,围岩稳定性得不到保证,爆破施工安全得不到保障。



图1 常规光面爆破爆后效果

Fig. 1 Post blasting effect of conventional smooth blasting

## 2 爆破设计

根据隧道洞身围岩的特点,Ⅲ级围岩开挖采用光面爆破,Ⅳ级围岩采用控制爆破。总的设计思想是拱部采用光面爆破,边墙采用预裂爆破,核心采用控制爆破。主要采用水垫封光面爆破掘进作业,严格控制超、欠挖,尽量减小扰动围岩。在施工中根据光面爆破设计结合现场地质情况进行爆破试验,不断修正爆破参数,达到最优爆破效果,采取边开挖边初期支护。

### 2.1 全断面爆破设计

对于隧道爆破开挖,爆破开挖方式和孔网参数与隧道围岩等级、炸药种类、炮孔大小和断面大小等有较大关系,而爆破效果的好坏则与掏槽方式、起爆顺序、进尺、装药结构等有关[7],爆破设计的合理性将严重影响爆破施工进度和成本。龙那1号隧道爆破开挖的掏槽眼、辅助眼及底板眼采用连续不耦合装药装药,采用1、3、5、7、9、11、13、15段毫秒延期爆破;周边眼采用轴向径向不耦合装药光面爆破,药卷之间采用导爆索连接,采用二级复式楔形

收稿日期:2018-04-25

作者简介:李继业(1975-),男,山东淄博人,路桥工程师,主要从事高速公路技术管理工作,(E-mail)602574716@qq.com。

通讯作者:何兴贵(1991-),男,贵州六枝人,工程师、硕士,主要从事工程爆破及安全技术研究,(E-mail)1175139942@qq.com。

基金项目:贵州省爆破工程技术研究中心能力提升平台建设,黔科合高G字(2015)4004;2017年创新型领军企业再支持,黔科合成果[2017]4774

掏槽作为掏槽方式,隧道断面炮孔设计图见图2,图中1#、3#、5#、7#、9#、11#、13#和15#分别代表1、3、5、7、9、11、13、15段别的延期导爆管雷管。

### 2.2 孔网参数

结合设备条件和要求设计光面爆破的爆破孔,炮孔直径为42 mm,周边眼孔间距E是直接控制开挖轮廓面平整度的主要因素,一般情况下 $E=(10 \sim 15)d$ ,d为炮孔直径,计算得到炮眼

间距E设计范围为420~630 mm,取450 mm;最小抵抗线的大小应以大于炮孔间距大小为原则,根据最小抵抗线计算公式: $W=E/m$ ,W为最小抵抗线,m为密集系数,m取0.8,计算得到 $W=562.5$  mm,取560 mm。根据现场实际施工条件,装药集中度q取0.2 kg/m,不耦合系数: $D=d_{孔}/d_{药}=1.4$ ;以上参数随岩石性质和具体的施工条件做适当调整,隧道全断面爆破参数见表1。

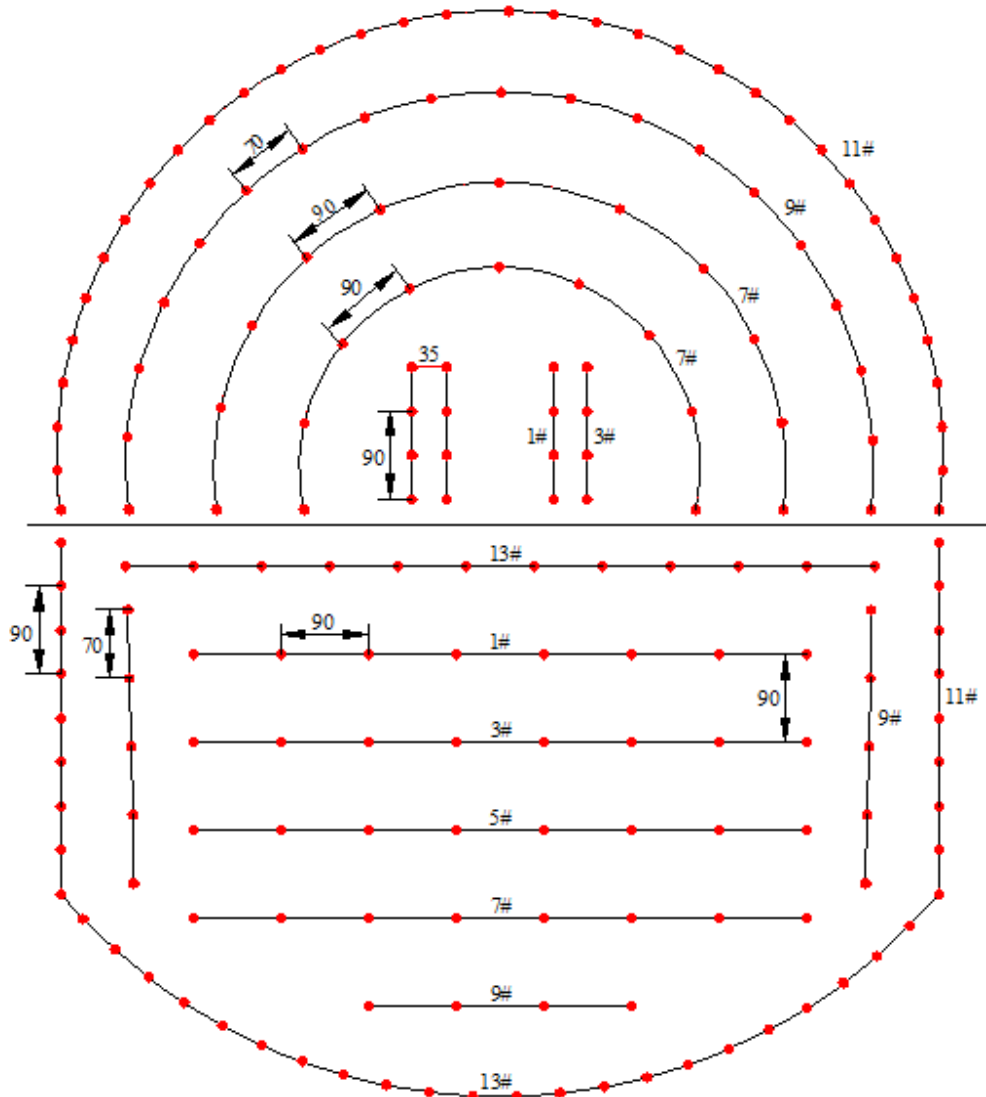


图2 隧道全断面炮孔设计图(单位:cm)

Fig. 2 Full section hole design drawing of tunnel(unit: cm)

## 3 水垫封光面爆破技术

为了高效利用炸药爆炸能量,同时实现降尘的目的,利用水垫封光面爆破关键技术,通过多个循环爆破效果对比分析,优化炮眼中顶部和底部注水长度与炮泥回填堵塞长度的最佳比例,对各部位炮眼进行药量分配,其装药量按照递减的原则进行分

配,周边眼采用小直径药卷。

### 3.1 水垫封光面爆破装药技术

#### (1) 爆破器材

炸药采用2#岩石乳化炸药,周边眼采用 $\phi 25$ mm药卷,炮孔内炸药通过导爆索连接,其它采用直径 $\phi 32$ mm标准药卷。连接管及孔内管均采用非电毫秒雷管。

表 1 隧道断面钻爆参数

Table 1 Drilling and blasting parameters of tunnel section

部位	炮眼名称	数量	炮眼深度/(m)	装药系数/(%)	药卷直径/(mm)	单孔装药量/(kg)	合计装药量/(kg)	类管段别
上断面	掏槽眼	8	1.8	80	32	1.05	8.40	MS-1
	掏槽眼	8	2.7	80	32	1.65	13.20	MS-1
	掘进眼	9	2.5	70	32	1.35	8.10	MS-3
	掘进眼	13	2.5	70	32	1.35	17.55	MS-5
	辅助眼	20	2.5	60	32	1.2	24.00	MS-5
	周边眼	37	2.5	40	25	0.6	22.20	MS-7
	底板眼	12	2.5	70	32	1.35	16.20	MS-9
	小计	107					109.65	
下断面	掏槽眼	8	2.5	70	32	1.35	10.80	MS-1
	掏槽眼	8	2.5	70	32	1.35	10.80	MS-3
	掘进眼	8	2.5	70	32	1.35	10.80	MS-5
	掘进眼	8	2.5	70	32	1.35	10.80	MS-5
	辅助眼	12	2.5	70	32	1.35	16.20	MS-7
	周边眼	12	2.5	40	25	0.6	7.20	MS-5
	底板眼	17	2.5	70	32	1.35	22.95	MS-7
	小计	73					89.55	

(2) 装药结构

周边眼装药结构采用轴向和径向不耦合装药,药卷之间采用导爆索进行连接,紧邻药卷的底部和顶部设置水袋,填塞物采用炮泥填塞,常规周边眼装药结构图和水垫封光面爆破周边眼装药结构图分别见图 3 和图 4。

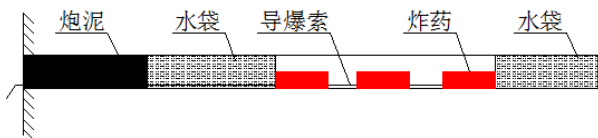


图 4 水垫封光面爆破装药结构示意图

Fig. 4 A schematic diagram of the structure of the

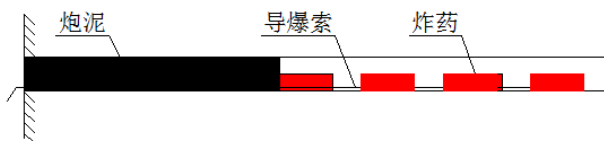


图 3 常规光面爆破装药结构示意图

Fig. 3 A schematic diagram of the structure of

(3) 水袋

往炮眼中注水的方法为采用普通的塑料袋,直接灌水并封口,要求水袋封口后不泄不漏、灌填饱满,总的灌水量根据炮孔内对水袋填塞部分的高度  $h$  要求进行调整,则灌水量为  $V = \pi h d^2 / 4$ ; 其中,  $V$  为灌水量,  $d$  为炮孔直径。

(4) 炮眼堵塞

每个作业面配 1 台炮泥机,现场加工炮泥,最小堵塞长度不小于 30cm,要求堵塞密实,不能有空隙或间断。

3.2 水垫封光面爆破实验

(1) 水垫封光面爆破优化实验

水垫封光面爆破主要是通过通过在孔底和药包以上部分设置水袋,炸药爆炸后释放的能量作用于水袋上,水袋在高温高压下发生气化,从而发生“水楔”效应,由于水具有不可压缩性,其破岩效果优于空气的破岩作用,因此水垫封光面爆破效果较常规光面爆破好,但是由于水袋的填塞高度影响炸药集中度,也会由于炸药位置的不同而影响爆破效果,最后对爆破后各指标造成影响;因此,采用设计方案参数作为优化实验孔网参数,首先选择水袋高度作为变量进行优化实验;底部水袋高度  $h_1$  参数分别为 10 cm、15 cm、20 cm、25 cm,顶部水袋高度  $h_2$  分别为 20 cm、25 cm、30 cm、35 cm,水袋总高度用  $h$  表示,其中:  $h = h_1 + h_2$ ,利用以上参数进行正交实验,具体优化实验参数和实验结果见表 2。

(2) 实验结果分析

1) 水袋总高度对平均半孔率的影响分析

水袋总高度对炮孔半孔率的影响主要是底部和顶部水袋的高度变化改变了药包在炮孔内位置,使炸药的能量分布发生改变,从而造成岩体不同程

度的损伤<sup>[8]</sup>,从而使半孔率发生改变。为了分析顶部水袋高度和底部水袋高度对平均半孔率的影响,选取不同顶部水袋和底部水袋的总水量情况下,半孔率的变化情况,水袋总高度和半孔率关系见图5;由图5可知,在底部水袋高度 $h_1$ 确定的情况下,随着水袋总高度 $h$ 的增加,半孔率降低;随着底部水袋高度的增加,半孔率总体逐渐减小。

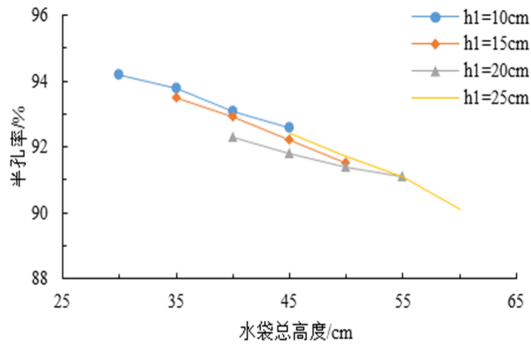


图5 水袋总高度和半孔率变化关系

Fig. 5 The relationship between the total height of water bag and the change of the half hole rate

2) 水袋总高度对炮孔平均利用率的影响分析

水垫封光面爆破主要是利用水袋替换空气作为爆炸能量的传播介质,将“气楔”作用变为“水楔”作用,但是由于爆炸应力波衰减速度较快,水袋高

度较大时,由于爆炸能量的衰减造成“水楔”作用降低,同时受到夹滞作用的影响,炮孔利用率发生改变。根据以上分析,采用底部水袋高度作为炮孔利用率的影响因素,分析炮孔利用率的变化关系,炮孔利用率随底部水袋高度变化关系见图6;由图6可知,当底部水袋 $h_1=10$  cm时,随着水袋总高度的增加,炮孔利用率呈现先减小后增加最后再减小的趋势;当底部水袋高度 $h_1>20$  cm时,底部水袋高度一定的情况下,随着水袋总高度增加,炮孔利用率逐渐降低;总体上来看,随着底部水袋高度的增加,炮孔利用率总体降低。

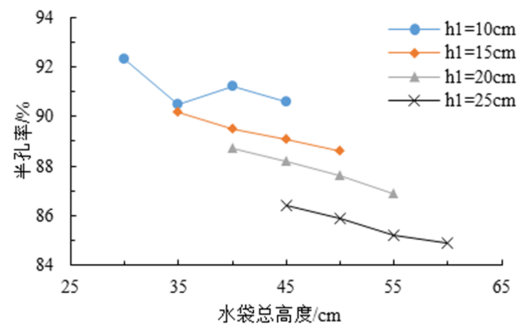


图6 水袋总高度和炮孔利用率变化关系

Fig. 6 The relationship between the total height of water bag and the utilization ratio of the gun hole

表2 水垫封光面爆破实验参数及结果

Table 2 Experimental parameters and results of the smooth blasting of water cushioning and sealing

实验编号	底部水袋高度 $h_1$ /cm	顶部水袋高度 $h_2$ /cm	平均半孔率/%	炮孔平均利用率/%	通风时间/min	进尺/m	爆破块度/cm
1	10	20	94.2	92.3	19.2	2.32	25
2	10	25	93.8	90.5	17.8	2.29	26
3	10	30	93.1	91.2	16.7	2.30	25
4	10	35	92.6	90.6	15.8	2.27	24
5	15	20	93.5	90.2	21.3	2.26	26
6	15	25	92.9	89.5	18.9	2.25	27
7	15	30	92.2	89.1	17.1	2.27	26
8	15	35	91.5	88.6	16.4	2.24	25
9	20	20	92.3	88.7	18.9	2.21	28
10	20	25	91.8	88.2	16.8	2.20	27
11	20	30	91.4	87.6	15.9	2.15	29
12	20	35	91.1	86.9	15.4	2.09	27
13	25	20	92.4	86.4	18.2	2.11	29
14	25	25	91.7	85.9	16.1	2.02	28
15	25	30	91.1	85.2	15.5	1.99	29
16	25	35	90.1	84.9	15.2	1.96	30

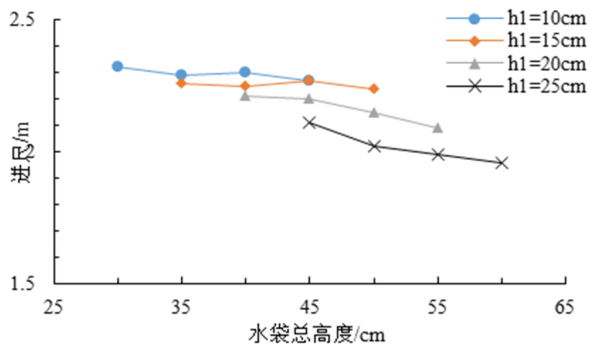


图 7 水袋总高度和进尺变化关系

Fig. 7 The relationship between the total height and the change of the size of a water bag

### 3) 水袋总高度对通风时间和爆破块度的影响

分析爆破粉尘是主要影响通风时间的主要因素,主要跟破碎程度和破碎量有关;利用水垫封光面爆破技术进行开挖,主要是通过用水量降低爆破粉尘量<sup>[9,10]</sup>,用水量的增加将增大降尘作用,从而减小通风时间;但是,随着用水量的增加,药量集中而使局部岩石破坏程度增加,从而造成粉尘量的增加;因此,不同的用水量对粉尘量具有很大的影响。采用 FCS-30 型粉尘采样器对爆破粉尘浓度进行监测,每次采样点距工作面相对位置及高度固定,当监测的粉尘浓度降低为  $4 \text{ mg/m}^3$  时,记录其通风时间。根据实验结果,水袋总高度与通风时间关系图见图 8;由图 8 可知,随着水袋总高度的增加,通风时间先增大后减小,当  $h_1=25 \text{ cm}$  时,整体通风时间较短。

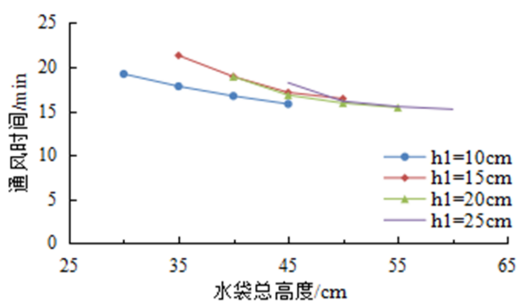


图 8 水袋总高度和通风时间变化关系

Fig. 8 The relationship between the total height of water bag and the change of ventilation time

爆破块度通常与线装药密度、孔网参数和地质构造条件有关,相邻炮孔的合理间距影响爆破效果的好坏<sup>[11]</sup>,对于合理的光面爆破孔网参数,线装药密度和地质构造条件为影响爆破块度的主要因素;在水垫封光面爆破过程中,水袋总高度影响药包之间的距离,从而影响线装药密度,改变了块度分布

情况;因此,选取水袋总高度和块度变化值进行分析得图 9,由图 9 可知,随着水袋总高度的增加,爆破块度总体呈现增大趋势,而底部水袋高度一定的情况下,爆破块度变化较小。

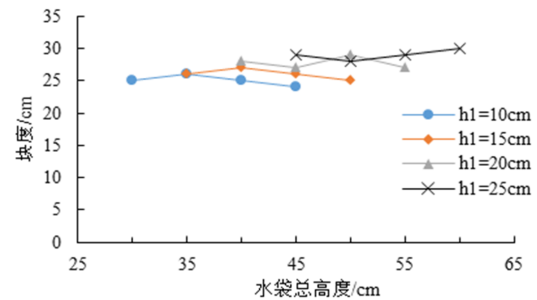


图 9 水袋总高度和块度变化关系

Fig. 9 The relationship between the total height of water bag and the change of the size of the water bag

综合以上实验结果可知,水袋总高度对半孔率、炮孔利用率和进尺的影响较大,水袋底部高度对炮孔利用率和半孔率影响较大;根据底部、顶部、总水袋高度对各指标影响情况,综合分析平均半孔率、炮孔平均利用率、通风时间、进尺、爆破块度实验结果,综合考虑爆破施工进度和爆破施工成本,以半孔率、炮孔利用率和进尺为水袋参数选择的主要指标,从半孔率方面角度分析,当  $h_1=15 \text{ cm}$ ,  $h_2=20 \text{ cm}$  和  $h_1=15 \text{ cm}$ ,  $h_2=25 \text{ cm}$  时,半孔率分别为 93.5%、92.9%,炮孔利用率分别为 90.2%、89.5%,进尺分别为 2.26 m、2.25 m,综合考虑进尺、通风时间和块度,选择  $h_1=15 \text{ cm}$ ,  $h_2=25 \text{ cm}$  作为水垫封光面爆破爆破参数更有利于提高爆破效果。

## 4 工程应用

为了对比分析水垫封光面爆破和常规光面爆破的效果,对现场进行常规装药爆破(现场装药结构见图 10),并测量各个参数,常规光面爆破和水垫封光面爆破效果参数见表 3。

从以上爆破效果对比分析可知,相比于常规光面爆破,利用水垫封光面爆破平均半孔率方面提高 8.7%,炮孔平均利用率增大 10.1%,通风时间减少 8.4 min,进尺增大 0.32 m,爆破最大块度减小 8 cm。由此可知,利用水垫封光面爆破可以实现较好的爆破效果,有利于加快施工进度,降低施工成本,同时可以保证施工人员的健康,利用水垫封光面爆破进行施工效果图见图 11。

表3 常规光面爆破和水垫封光面爆破爆破效果参数

Table 3 The effect parameters of conventional smooth blasting and the smooth blasting of water cushioning and sealing blasting

名称类别	平均半孔率/%	炮孔平均利用率/%	通风时间/min	进尺/m	爆破块度/cm
水垫封光面爆破	92.9	88.6	16.4	2.24	25
常规光面爆破	84.2	78.5	24	1.92	33
差值	8.7	10.1	-8.4	0.32	-8



图10 现场装药结构图

Fig. 10 Structure drawing of field charge



图11 水垫封爆破光面爆破爆后效果

Fig. 11 Effect of blasting after blasting in the smooth blasting of water cushioning and sealing

## 5 结论

通过本工程水垫封光面爆破优化实验,根据各项指标实验结果,选择合理的爆破参数,并与常规光面爆破结果进行对比分析,得到以下结论:

(1)在底部水袋高度确定的情况下,随着水袋总高度的增加,半孔率降低;随着底部水袋高度的增加,半孔率总体逐渐减小。

(2)当底部水袋高度大于20cm时,底部水袋高度一定的情况下,随着水袋总高度增加,炮孔利用率逐渐降低;总体上来看,随着底部水袋高度的增加,炮孔利用率总体降低。

(3)随着水袋总高度的增加,通风时间先增大后减小,爆破块度总体呈现增大趋势,而底部水袋高度一定的情况下,爆破块度变化较小。

当然,对于水垫封光面爆破,不同的孔网参数对应不同的装药量,造成同一孔底水袋和顶部水袋高度会产生不同的爆破效果;因此,在水袋高度参数的选择应根据孔网参数进行优化,方能有效的提高爆破效果。

## 参考文献 (References)

- [1] 龙 勇,朱传贤,王明宽. 长龙山抽蓄电站光面爆破技术的应用[J]. 工程爆破,2017,23(04):75-77+81.
- [1] LONG Yong,ZHU Chuan-xian,WANG Ming-kuan. Application of smooth blasting technology in Changlongshan pumping power station [J]. Engineering Blasting. 2017, 23(4):75-77, 81. (in chinese)
- [2] 罗志光,张长亮,陈力华,涂 维. 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,2017,13(S2):578-584.
- [2] LUO Zhi-guang,Zhang Changliang,Chen Lihua,Tu Wei. Field Trial of Uncoupled Charge Smooth Blasting for Highway Tunnel. Chinese Journal of Underground Space and Engineering2017,13(S2):578-584. (in chinese)
- [3] 刘 坚,李泽华,白和强,张 昭,曹庭校,陈 震. 露天矿爆破粉尘排放量影响因素分析及试验研究[J]. 爆破,2017,34(4):169-174.

- [3] LIU Jian, LI Ze-hua, BAI He-qiang, ZHANG Zhao, CAO Ting-xiao, CHEN Zhen. Research on Influence Factors of Blasting Dust Emission of Open-pit Mine. [J] Blasting. 2017,34(4):169-174. (in chinese)
- [4] 李海港, 齐宏, 张蔚博. 水压爆破在隧道施工中的应用[J]. 公路, 2016, 61(6):280-283.
- [4] LI Hai-gang, QI Hong, ZHANG Wei-bo. Application of water pressure blasting in tunnel construction. Highway, 2016, 61(06):280-283. (in chinese)
- [5] 刘海波, 白宗河, 刘学攀, 陈磊. 隧道掘进聚能水压光面爆破新技术与应用[J]. 工程爆破, 2017, 23(1):81-84.
- [5] LIU Hai-bo, BAI Zong-he, LIU Xue-pan, CHEN Lei. New technology application of tunnel excavation shaped hydraulic smooth blasting. [J] Engineering Blasting, 2017, 23(1):81-84. (in chinese)
- [6] 王振江, 刘其亮, 朱俊虎. 隧道水压光面爆破施工技术的经济性分析[J]. 施工技术, 2016, 45(S1):512-514.
- [6] Blasting Construction Technology Wang Zhenjiang, Liu Qiliang, Zhu Junhu. Economic Analysis on Tunnel Hydraulic Pressure Smooth. construction Technology, 2016, 45(S1):512-514. (in chinese)
- [7] 满轲, 刘晓丽, 王锡勇, 陈振鸣, 陈亮, 王驹. 掏槽方式对光面爆破效果的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(19):92-98.
- [7] Man Ke, LIU Xiaoli, WANG Xiyong, CHEN Zhenming, CHEN Liang, WANG Ju. Study on the influence of cutting mode on the blasting effect of light surface. [J] Science Technology and Engineering. 2017, 17(19):92-98. (in chinese)
- [8] 李健钰, 蒲传金, 陈贵新, 李阳, 冯阳阳, 肖定军. 不同位置间隔装药爆破损伤实验[J]. 金属矿山, 2017(12):21-27.
- [8] Li Jianyu, Pu Chuanjin, Chen Guixin, Li Yang, Yangyang Fen, Xiao Dingjun. Experiments of Deck Charging Blasting Damage at Different Positions [J]. Metal mine. 2017(12):21-27. (in chinese)
- [9] 张昭, 佟彦军, 李泽华, 白和强, 刘敬智. 露天矿山台阶爆破爆炸水雾降尘实验[J]. 工程爆破, 2017, 23(5):71-75.
- [9] ZHANG Zhao. TONG Yan-jun. LI Ze-hua. BAI He-qiang. LIU Jing-zhi. The experiment of using explosion water mist reduce dust in the bench blasting of open-pit mine, Engineering blasting, 2017, 23(5):71-75. (in chinese)
- [10] 郝成磊, 李宏伟, 俞正洪, 刘敬智, 王洪强, 潘峰. 露天台阶爆破水雾降尘技术及效果评价[J]. 爆破器材, 2018, 47(1):59-64.
- [10] HAO Chenglei, LI Hongwei, YU Zhenghong, LIU Jing-zhi, WANG Hongqiang, PAN Feng. Dust Suppression Technology by Blasting Spray and Its Effect in Open Beach Blasting. Explosive Materials. , 2018, 47(1):59-64. (in chinese)
- [11] 戴俊, 李传净, 陈哲浩, 杜文平. 光面爆破相邻炮孔裂纹扩展模拟[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(18):193-197.
- [11] DAI Jun, LI Chuan-jing, CHEN Zhe-hao, DU Wenping. Simulation of crack propagation in adjacent blasting holes in smooth blasting. Science Technology and Engineering. 2017, 17(18):193-197. (in chinese)

英文编辑:黄刚

(上接第64页)

- [11] 严鹏, 卢文波, 陈明, 等. 初始地应力场对钻爆开挖过程中围岩振动的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(5):1036-1045.
- [11] YAN Peng, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Study on impact of initial geostress field on vibration of surrounding rock during excavation with drilling and blasting method [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(5):1036-1045. (in Chinese)
- [12] 卢文波, 金李, 陈明, 等. 节理岩体爆破开挖过程的动态卸载松动机理[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(a01):4653-4657.
- [12] LU Wen-bo, JIN Li, CHEN Ming, et al. Study on the mechanism of jointed rock mass loosening induced by dynamic unloading of initial stress during rock blasting [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(a01):4653-4657. (in Chinese)
- [13] 金李, 卢文波, 陈明, 等. 节理岩体的爆破松动机理[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(5):474-480.
- [13] JIN Li, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Mechanism of jointed rock loosening under blasting load[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(5):474-480. (in Chinese)
- [25] 丛宇, 冯夏庭, 郑颖人, 等. 应变型岩爆孕育过程的弹塑性破坏机制探索(I 静力部分)[C]// 第十五届全国岩石动力学学术会议论文选集, 2017:95-107.
- [26] CONG Yu, FENG Xia-ting, ZHENG Ying-ren, et al. Exploration on elastic-plastic failure mechanism of strain mode rockburst in preparation process (the static part) [C]// The Fifteenth National Symposium on Rock Dynamics, 2017:95-107. (in Chinese)

英文编辑:任高峰