

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.05.008

隧道掘进水封光面爆破装药结构的优化试验研究*

宿利平^① 洪政^② 谷桂丽^① 伏永贵^① 张小军^② 高文学^②

①北京市政路桥股份有限公司(北京,100045)

②北京工业大学城市建设学部(北京,100124)

[摘要] 为减少隧道掘进爆破时出现炸药能量利用率低、粉尘浓度高、超挖或欠挖严重等问题,在109国道新线高速公路小龙门隧道开挖过程中,开展水封光面爆破技术试验研究。以炮孔上部、底部水袋的长度与炮泥堵塞长度为试验因素,以平均半孔率、平均炮孔利用率与粉尘浓度降低率为爆破效果衡量指标进行正交试验。研究结果表明:影响平均半孔率和粉尘浓度降低率的因素依次为炮孔上部水袋长度、炮孔底部水袋长度、炮泥堵塞长度;而影响平均炮孔利用率的因素依次为炮泥堵塞长度、炮孔上部水袋长度、炮孔底部水袋长度。在现场试验条件下,确定了水封光面爆破中较优的装药结构参数,即:炮孔上部水袋长度30 cm,炮孔底部水袋长度20 cm,炮泥堵塞长度30 cm。取优化后的装药结构参数进行试验发现,相比常规光面爆破,平均半孔率、平均炮孔利用率和粉尘浓度降低率分别提高了6.3%、7.1%、7.6%。优化后的水封光面爆破装药结构具有较好的爆破效果。

[关键词] 隧道掘进;水封光面爆破;正交试验;参数优化

[分类号] TJ510.3;TD235.4

Experimental Study on Optimization of Charge Structure in Water Sealed Smooth Blasting of Tunnel Excavation

SU Liping^①, HONG Zheng^②, GU Guili^①, FU Yonggui^①, ZHANG Xiaojun^②, GAO Wenxue^②

①Beijing Municipal Road and Bridge Co., Ltd. (Beijing, 100045)

②Faculty of Urban Construction, Beijing University of Technology (Beijing, 100124)

[ABSTRACT] In order to reduce the problems of low utilization rate of explosives, high concentration of dust and obvious phenomenon of over-excavation and under-excavation in tunneling excavation blasting, an experimental study on water sealed smooth blasting technology was carried out in the excavation process of Xiaolongmen Tunnel on New Line Expressway of National Highway 109. Orthogonal test was carried out. The length of water bag at the upper and bottom of the blast hole, and the length of blast mud blockage were taken as test factors. The average half-hole rate, the average utilization rate of blast hole and the reduction rate of dust were taken as evaluation indexes of blasting effect. The test results show that the factors affecting the average half-hole rate and dust reduction rate are the length of water bag at the upper part of the blast hole, the length of water bag at the bottom of the blast hole, and the length of blast mud blockage. The factors affecting the average utilization rate of blast holes are the length of sludge blockage, the length of water bags at the upper and bottom of blast holes in turn. The optimum charge structure parameters of water sealed smooth blasting were determined under the field test conditions. The length of water bag at the upper part of the blast hole is 30 cm, the length of water bag at the bottom of the blast hole is 20 cm, and the length of blast mud blockage is 30 cm. Compared with the charge structure of conventional smooth blasting, the average half-hole ratio, the average utilization ratio of blast hole and dust reduction ratio increase by 6.3%, 7.1% and 7.6% respectively after optimization. The optimized charge structure of water sealed smooth blasting has good blasting outcomes.

[KEYWORDS] tunnel excavation; water sealed smooth blasting; orthogonal test; parameter optimization

* 收稿日期:2021-10-29

基金项目:爆破工程湖北省重点实验室开放基金(BL2021-23)

第一作者:宿利平(1980-),男,工程师,主要从事道路与桥梁工程技术研究。E-mail:82479211@qq.com

0 引言

隧道掘进爆破过程中,半孔率、炮孔利用率、超挖或欠挖率、粉尘浓度等效果衡量指标影响着爆破施工的经济性与合理性,而炮孔的装药结构是影响这些指标的重要因素^[1-3]。装药结构的变化使得冲击波在传播过程中发生改变,从而影响爆破破岩效果及爆破振动效应。朱宽等^[4]建立了连续堵塞和空气间隔堵塞的结构模型,对比分析得出:空气间隔堵塞能控制爆源中心的过度破碎,减小粉碎区区域;刘江超等^[5]通过LS-DYNA模拟3种水封装药结构,发现两端水封的爆破装药结构的爆破效果最优;罗志光等^[6]采用固、液、气三相爆破技术,有效控制了隧道超挖、欠挖现象;王立川等^[7]通过现场试验与数值模拟得出,在掏槽孔药量相同的情况下,水介质轴向不耦合装药爆破引起衬砌结构的振速明显小于空气介质不耦合装药爆破;李启月等^[8]采用预留光爆层水压爆破技术,有效控制了大断面隧道掘进爆破的有害效应。

水封爆破技术采用在炮孔上部与底部装填一定注水量的水袋、再用炮泥堵塞炮孔的装药结构。较多文献对水封爆破的装药结构进行了研究,并取得了丰硕的成果。研究者对装药结构的各部分比例研究较少;而炮孔上部与底部的水袋长度与炮泥堵塞长度的不同比例对隧道断面的平整性、爆破能量的利用率以及粉尘浓度的降低率等有很大的影响。

本文中,以109国道新线高速公路小龙门隧道为工程背景,采用水封光面爆破,利用正交试验对隧道掘进爆破效果进行对比分析,得到最优的装药结构形式。研究结果对隧道掘进爆破施工以及控制爆破危害具有一定的指导作用。

1 隧道掘进水封光面爆破

1.1 场地概况

109国道新线高速公路小龙门隧道地处北京市西部山区。全线地质以石灰岩、安山玢岩、斑岩为主,岩石抗压强度介于30~60 MPa之间。隧道左线全长4 377.62 m,其中,IV级岩石占31.97%,III级岩石占41.72%;右线全长4 397 m,IV级岩石占比36.37%,III级岩石占比38.90%。根据JTGD70—2004《公路隧道设计规范》规定,小龙门隧道左、右线长度均大于3 000 m,属于特长隧道。

基于小龙门隧道所处的地形、地质条件,隧道掘进爆破存在的主要问题有:

1)小龙门隧道属于特长隧道,隧道掘进爆破产生的粉尘通过通风方式排出耗时较长,直接影响施工进度与施工人员的身体健康;

2)围岩地质条件整体较好,岩石抗压强度高,炸药单耗量较大;

3)使用常规装药结构进行光面爆破时,隧道断面完整性较差,超挖或欠挖现象明显。

因此,开展隧道掘进水封爆破技术研究具有重要的现实意义。

1.2 水封光面爆破设计

1.2.1 水封光面爆破基本原理

炮孔两端装有水袋。炸药爆炸后,水由于具有不可压缩性,能有效地将爆破能量传输至炮孔围岩中;水袋也起到了等效药柱的作用^[9],避免了爆破形成的压应力集中在药柱周围。同时,水在高温、高压条件下发生汽化,汽化的水将尘埃颗粒吸收,达到了降尘的效果;炮孔堵塞后,可以延长炮孔内高温、高压状态的时间,延长了爆生气体的作用时间,促进了岩石裂隙的发展,从而提高爆破能量利用率。因而,水封爆破效果较常规爆破效果好。

1.2.2 水封光面爆破设计方案

小龙门隧道IV级围岩采用上下台阶法施工。设计炮孔深度为2.4 m,上台阶循环进尺2.2 m,炮孔布置以及起爆顺序如图1所示。在隧道开挖过程中,爆破设计的合理与否直接关系到爆破效果的好坏。根据现场设备情况和光面爆破的设计要求,周边孔孔径 d 为42 mm,孔距 $E=(10\sim 15)d$,设计取 E 为50 cm。为保证隧道爆破开挖的平整度,最小抵抗线(光爆层厚度)应大于周边孔的孔间距。选用公式 $W=E/m$ 计算最小抵抗线;其中, m 为密集系数,取0.8。计算得出 $W=62.5\text{ cm}$,取 W 为65 cm。采用复式斜孔掏槽,掏槽孔、辅助孔、周边孔间的延期时间设计,如图1所示。现场爆破施工时,根据围

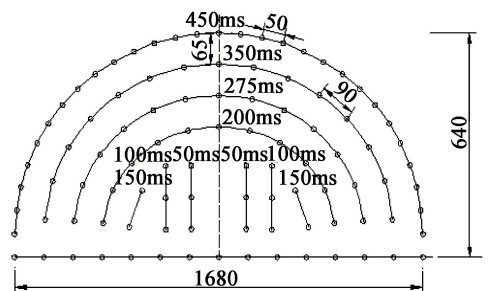


图1 上台阶炮孔设计图(单位:cm)

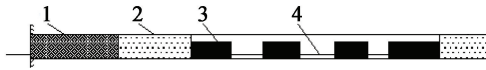
Fig. 1 Design drawing of upper bench blast holes (Unit: cm)

岩特性以及施工情况,对上述参数进行调整、优化。

1.2.3 水封光面爆破装药技术

1.2.3.1 装药结构

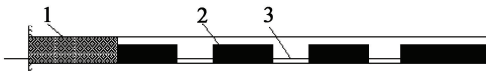
水封光面爆破周边孔装药结构中,炮孔炸药上部与底部填装水袋,再用炮泥填塞炮孔口,炮孔径向采用空气不耦合装药,药卷之间采用导爆索进行连接。常规光面爆破与水封光面爆破的装药结构分别如图 2、图 3 所示。掏槽孔、辅助孔亦采用类似的装药结构。



1 - 炮泥; 2 - 水袋; 3 - 炸药; 4 - 导爆索。

图 2 水封光面爆破装药结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the charging structure for water sealed smooth blasting



1 - 炮泥; 2 - 炸药; 3 - 导爆索。

图 3 常规光面爆破装药结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the charging structure for conventional smooth blasting

1.2.3.2 水袋

水袋用 KPS-60 型塑袋灌装机加工制作而成。制备水袋时,要保证装水体积占水袋容积的 90% 左右,并且水袋中没有气泡,用手握水袋也不易出现凹痕。水袋长度可根据需求制作。

1.2.3.3 炮泥

炮泥按质量比 $m(\text{土}) : m(\text{沙}) : m(\text{水}) = 75 : 10 : 15$ 配制,由 PNJ-A 炮泥机加工而成。炮泥要均匀,不得含有颗粒、碎石等杂质。炮泥硬度要适中:过软起不到良好的封堵作用;过硬容易造成封堵不密实现象。

2 水封光面爆破装药结构优化

水袋的长度影响炸药的集中度,而炸药位置的不同影响爆破效果;同样,选择合理的炮泥堵塞长度也很重要。如果堵塞长度过长,容易造成崩落岩块过大,产生欠挖现象;炮泥堵塞长度过短,则难以达到堵塞效果,造成能量的浪费。优化试验中,选择炮孔上部水袋长度、炮孔底部水袋长度与炮泥堵塞长度作为变量。炮孔上部水袋长度 A 分别为 20、25、30 cm;炮孔底部水袋长度 B 分别为 15、20、25 cm;炮泥堵塞长度 C 分别为 20、30、40 cm。对以上参数

进行正交试验。

2.1 爆破效果衡量指标

2.1.1 平均半孔率与平均炮孔利用率

测试在同一级别围岩的情况下进行,且选取的孔网参数相同,循环进尺为 2.2 m。每种方案测试 3 次,结果取 3 次试验的平均值,用于计算平均半孔率 $\eta_{\text{半孔率}}$ 与平均炮孔利用率 $\eta_{\text{利用率}}$ 。

$$\eta_{\text{半孔率}} = \frac{\sum l_0}{\sum L_0} \times 100\%; \quad (1)$$

$$\eta_{\text{利用率}} = \frac{Ln - \sum l_1}{Ln} \times 100\%。 \quad (2)$$

式中: $\sum l_0$ 为开挖断面上残留炮孔长度的总和; $\sum L_0$ 为周边孔炮孔长度的总和; $\sum l_1$ 为炮孔未爆部分总长; L 为炮孔孔深; n 为爆破孔个数。

2.1.2 粉尘浓度降低率

在距上台阶爆破掌子面中心线 50 m 处设置了测点,采用 CZZ1000 直读式粉尘浓度测定仪对不同装药结构爆破后的粉尘浓度进行监测。爆破后,暂停通风,开启粉尘仪装置采样 10 min。计算粉尘浓度降低率 $\eta_{\text{降低率}}$ 。

$$\eta_{\text{降低率}} = \frac{m - m_0}{m} \times 100\%。 \quad (3)$$

式中: m_0 为 10 min 后使用仪器采样滤膜的质量; m 为 1 min 后使用仪器采样滤膜的质量。

试验因素及水平如表 1 所示。

表 1 试验因素与水平

Tab. 1 Test factors and levels cm

水平	炮孔上部水袋长度 A	炮孔底部水袋长度 B	炮泥堵塞长度 C
1	20	15	20
2	25	20	30
3	30	25	40

2.2 试验结果与分析

通过正交试验,探索水封爆破在不同的炮孔上部水袋长度、底部水袋长度与炮泥堵塞长度参数组合下的平均半孔率、平均炮孔利用率以及粉尘浓度降低率的最佳值。得出最佳工作参数,有利于合适的水封爆破装药比例的推广与应用,正交试验方案与结果如表 2 所示。

由表 2 可知:平均半孔率的范围为 90.5% ~ 94.1%;平均炮孔利用率范围为 88.5% ~ 91.7%;10 min 内粉尘浓度降低率范围为 18.9% ~ 32.1%。平均半孔率及粉尘浓度降低率影响因素的主次顺序均为 A、B、C。其中,平均半孔率的较优方案为 A_2 、 B_2 、 C_2 ,即炮孔上部水袋长度 25 cm、炮孔底部水袋长度

20 cm、炮泥填塞长度 30 cm;粉尘浓度降低率的较优方案为 A_3 、 B_3 、 C_2 ,即炮孔上部水袋长度 30 cm、炮孔底部水袋长度 25 cm、炮泥填塞长度 30 cm。平均炮孔利用率影响因素的主次顺序均为 C 、 A 、 B ;其中,平均炮孔利用率的较优方案为 A_3 、 B_2 、 C_3 ,即炮孔上部水袋长度 30 cm、炮孔底部水袋长度 20 cm、

炮泥填塞长度 40 cm。用方差分析法中各个试验因素对指标的显著影响程度进行评估,结果如表 3 所示。表 3 中, P 是检验水平, F 是显著性差异水平。

由表 3 可知,炮孔上部水袋长度、底部水袋长度与炮泥堵塞长度对平均半孔率影响显著;其中,炮孔上部水袋长度影响极其显著。上述分析表明:炸药

表 2 试验方案与结果

Tab. 2 Experimental scheme and results

试验号	试验因素				平均半孔率/%	平均炮孔利用率/%	粉尘浓度降低率/%
	A	B	C	空列			
1 [#]	1	1	1	1	90.5	88.5	18.9
2 [#]	1	2	2	2	92.4	89.6	20.7
3 [#]	1	3	3	3	91.1	91.3	21.4
4 [#]	2	1	2	3	93.8	90.1	21.8
5 [#]	2	2	3	1	94.1	91.7	22.7
6 [#]	2	3	1	2	93.2	89.2	24.4
7 [#]	3	1	3	2	91.5	92.2	26.6
8 [#]	3	2	1	3	92.4	90.3	28.6
9 [#]	3	3	2	1	92.2	91.0	32.1
$(k_1)_1$	91.333	91.933	92.033	92.267			
$(k_1)_2$	93.700	92.967	92.800	92.367			
$(k_1)_3$	92.033	92.167	92.233	92.433			
R_1	2.367	1.034	0.767	0.166			
$(k_2)_1$	89.800	90.267	89.333	90.400			
$(k_2)_2$	90.333	91.533	90.233	90.333			
$(k_2)_3$	91.167	90.500	91.733	90.567			
R_2	1.367	0.266	2.400	0.234			
$(k_3)_1$	20.333	22.433	23.967	24.567			
$(k_3)_2$	22.967	24.000	24.867	23.900			
$(k_3)_3$	29.100	25.967	23.567	23.933			
R_3	8.767	3.534	1.300	0.667			

表 3 方差分析

Tab. 3 Analysis of variance

指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	显著性 P
平均半孔率	A	8.869	2	4.434	210.052	***
	B	1.762	2	0.881	41.736	**
	C	0.949	2	0.474	22.473	**
			6			
平均炮孔利用率	A	2.847	2	1.423	32.846	**
	B	0.127	2	0.063	1.461	
	C	8.820	2	4.410	101.769	***
			6			
粉尘浓度降低率	A	121.406	2	60.703	143.394	***
	B	18.807	2	9.403	41.736	**
	C	2.660	2	1.330	22.473	
			6			

注: $P < 0.05$ 为显著,记为 **; $P < 0.01$ 为极其显著,记为 ***。

在炮孔内的位置随着炮孔上部水袋长度、底部水袋长度与炮泥堵塞长度的改变而改变;当药卷在炮孔的中间位置时,炸药爆炸能量不会出现下大、上小或者上大、下小的现象,孔壁能量分布均匀,从而形成的隧道断面相对光滑。

炮孔上部水袋长度与炮泥堵塞长度对平均炮孔利用率影响显著,但底部水袋长度对平均炮孔利用率影响不显著。分析认为,炮泥的堵塞会加强炮轰气体在炮孔内的存留时间。炮孔上部水袋会凭借不可压缩的特点,相当于加强了炮孔填塞,从而能够更好地传递爆炸能量,且爆炸能量流失更少;而炮孔底部水袋的水可以减缓压力。

炮孔上部水袋长度、底部水袋长度对粉尘浓度降低率影响显著。其中,炮孔上部水袋长度影响尤其显著;而炮泥堵塞长度对粉尘浓度降低率影响相对不显著。分析认为,炸药爆炸的瞬间能量使水袋中的水在高温、高压下雾化为水蒸气,增加了与粉尘的接触面积;当水雾与固体尘粒结合在一起,形成了更大的尘粒,尘粒在吸收水分后,密度明显提高,最终导致灰尘的沉淀。所以水分越多,除尘效果越好。同时,由于爆轰气体携带粉尘往炮孔口方向溢出,因而上部水袋比底部水袋作用更加明显;上部水袋越长,除尘效果越优。

试验结果及分析表明:炮孔上部水袋长度、炮孔底部水袋长度与炮泥堵塞长度的较优方案为 A_3 、 B_2 、 C_2 ,即炮孔上部水袋长度为 30 cm、炮孔底部水袋长度为 20 cm、炮泥堵塞长度为 30 cm。

3 工程应用

通过分析,初步确定了水封光面爆破较优的装药结构参数,并在小龙门隧道中与常规光面爆破装药结构进行对比试验。试验前,测得隧道围岩为 IV 级围岩,采用前述试验方案和评价指标,现场装药如图 4 所示。优化后的水封光面爆破装药结构和常规光面爆破装药结构的爆破效果指标如表 4。



图 4 水封爆破现场装填

Fig. 4 On site filling drawing of water sealed blasting

表 4 优化后的水封光面爆破和常规光面爆破效果指标

Tab. 4 Blasting outcome indicators of optimized water seal smooth blasting and conventional smooth blasting %

装药结构	平均半孔率	炮孔平均利用率	10 min 后粉尘浓度降低率
优化后水封光面爆破	91.6	90.7	21.9
常规光面爆破	85.3	83.6	14.3
差值	6.3	7.1	7.6

分析表 4 可知,优化后的水封光面爆破装药结构与常规光面爆破装药结构相比,爆破后的平均半孔率、平均炮孔利用率、爆破 10 min 后粉尘降低率分别提高了 6.3%、7.1%、7.6%。由此可知,利用优化后的水封光面爆破装药结构可以取得较好的爆破效果。

4 结论

1) 水封光面爆破装药结构中,炮孔上部水袋长度、底部水袋长度与炮泥堵塞长度的不同比例,对隧道断面的平整性、爆破能量的利用率以及粉尘浓度的降低率有着很大的影响。

2) 基于正交试验,确定了平均半孔率与粉尘浓度降低率的影响因素主次顺序为:炮孔上部水袋长度、炮孔底部水袋长度、炮泥堵塞长度;平均炮孔利用率影响因素顺序为:炮泥堵塞长度、炮孔上部水袋长度、炮孔底部水袋长度。为了优先保证平均半孔率的情况下最大限度地降低粉尘浓度,提高平均炮孔利用率,确定了试验条件下水封光面爆破最优的装药结构:炮孔上部水袋长度为 30 cm、炮孔底部水袋长度为 20 cm、炮泥堵塞长度为 30 cm。

3) 以较优的装药参数进行隧道爆破验证试验。结果表明:采用优化后的水封光面爆破技术,比常规光面爆破的平均半孔率、平均炮孔利用率以及 10 min 后粉尘浓度降低率分别提高了 6.3%、7.1%、7.6%,爆破效果良好。

参考文献

- [1] 李继业,张剑兴,何兴贵,等. 水垫封光面爆破技术在隧道掘进中的应用研究[J]. 爆破,2020, 37(1): 74-80.

