

针对消除落石危害的爆破参数优化研究

何 闯,王海亮

(山东科技大学 矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室培育基地,山东 青岛 266590)

摘 要:为消除分次爆破带来的落石危害,以青岛地铁延安路车站主体Ⅱ部侧穿冠业大厦工程为背景,通过对空腔存在下的萨式公式进行回归,重新确定单段最大起爆药量,并结合多自由面存在下的减振作用,优化原爆破方案的单段最大起爆药量、掏槽型式、炮孔间排距、起爆网路等爆破参数。结果表明:优化后的全断面一次起爆方案不仅将爆破振速控制在 0.7 cm/s 的以内、消除了落石危险,而且每爆破循环减少用时 1 h,节约雷管 20 发,节约炸药 13.35 kg。

关键词:落石;一次起爆;爆破振速;双侧壁导坑法;地铁

中图分类号:TB41

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2016)02-0079-07

Research on Blasting Parameter Optimization to Eliminate Rockfall Hazards

HE Chuang, WANG Hailiang

(State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control Co-founded by Shandong Province and the Ministry of Science and Technology, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: To eliminate rockfall hazards brought by split blasting, this research took the main II project of Qingdao Metro's Yan'an Road Station passing through Guanye building as the research background. It redefined single biggest priming dose through the regression formula of Sodev's empirical formula in the presence of the cavity and optimized blasting parameters of the original blasting scheme such as single biggest priming dose, cutting type, row spacing between holes, and blasting network by combining with the cushioning effect in the presence of multiple free surface. Results show that the optimized scheme of whole section one-time blasting not only eliminates the rockfall risk by controlling the blasting vibration velocity within 0.7 cm/s, but also saves 20 detonators and 13.35 kg explosives by decreasing 1 h per blasting per cycle.

Key words: rockfall; one-time blasting; blasting vibration velocity; double side heading method; metro

采用双侧壁导坑法施工的地铁隧道,在第一层导洞施工完成后,第二层导洞拱顶部分的围岩受爆破扰动、岩体较破碎。当第二层导洞采用全断面分次爆破时,虽然可以减少单段最大起爆药量,较好地控制爆破振动,但在掏槽区域爆破完成后,经“敲帮问顶”的拱顶岩石仍然存在冒落的危险,给装药工人的人身安全构成威胁。如何在满足爆破振动的条件下,将第二层导洞的全断面分次起爆优化为全断面一次起爆,成为研究重点和难点。目前,对双侧壁导坑法爆破方案的研究集中在第一层导洞的爆破振速控制^[1-4],而对第二层导洞的爆破方案研究较少。本研究以青岛地铁 2 号线延安路车站主体第二层Ⅱ部侧穿冠业大厦工程为背景,

收稿日期:2015-11-18

基金项目:国家自然科学基金项目(10672091);2015—2016 年度山东科技大学研究生科技创新基金项目(YC150304)

作者简介:何 闯(1990—),男,河北邯郸人,硕士研究生,主要从事隧(巷)道爆破、隧(巷)道支护等方面的研究。

E-mail:584650078@qq.com

王海亮(1963—),男,河北石家庄人,教授,博士生导师,主要从事工程爆破、地下工程、安全评价理论等方面的研究。

E-mail:tlgcbp@263.net

对第一层导洞存在下的萨式公式进行回归,重新确定单段最大起爆药量,并结合多自由面存在下的减振作用,优化原爆破方案的单段最大起爆药量、炮孔间排距、掏槽型式、起爆网路等爆破参数,实现了全断面一次起爆。

1 工程概况

青岛地铁 2 号线延安路站总体为暗挖单拱双层结构,车站中心里程处拱顶覆土约 17 m,全长 160 m。车站主体开挖断面宽 23.44 m,高 18.37 m,采用双侧壁导坑法施工。工程各分部见图 1,其中车站 I 部、IV 部已施工完成,II 部施工至 40 m。II 部开挖断面宽 8.3 m,高 4.4 m,断面面积 36.3 m²,围岩等级 IV~V。车站西侧为冠业大厦 29 层楼,项目部要求振速控制在 1.0 cm/s 以下。采用两台 TC-4850 测振仪测振,测点位于冠业大厦负一层,随爆破掌子面移动,测点位置见图 1。冠业大厦距离车站主体 II 部水平距离 15.1 m,垂直距离 23.1 m。车站主体与冠业大厦平面及剖面位置关系如图 1。

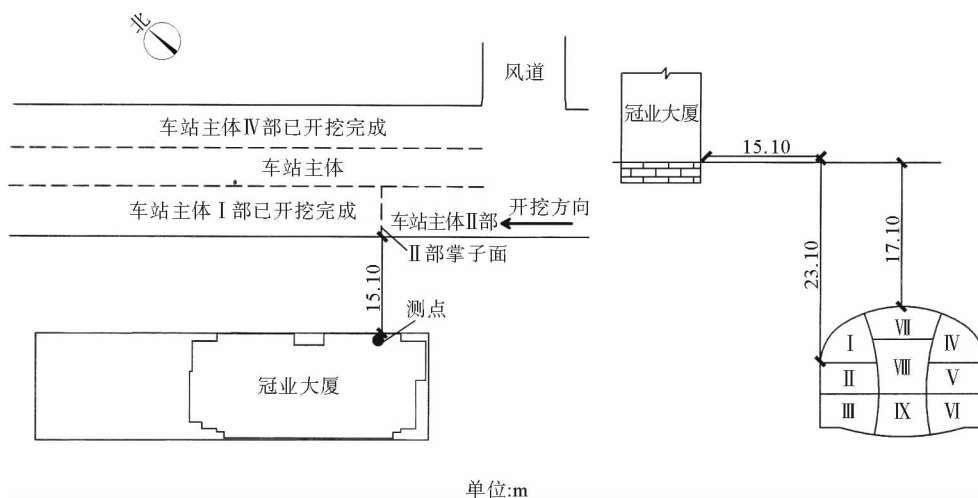


图 1 车站与冠业大厦的平面及剖面位置关系

Fig. 1 Location of the plane and profile of the relationship between station and the Guanye building

2 原爆破方案

车站 II 部采用 YT28 型气腿式凿岩机钻眼。雷管采用第一系列毫秒延期塑料导爆管雷管,所用段别为 1,3~20 共 19 个段别。炸药为 2 号岩石乳化炸药,规格为 $\Phi 32 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$,每卷 0.3 kg。导爆管网路传爆联接方式为簇联。掏槽采用三级楔形掏槽,各掏槽眼炮孔深度及倾角见图 2,其他各炮孔的炮孔深度为 2.0 m,爆破循环进尺 1.8 m;炮孔个数 101 个,比钻眼数为 2.78 个/m²;共使用雷管 112 发(含孔外延期雷管);单段最大起爆药量 1.2 kg,耗用炸药总量为 54.15 kg(其中掏槽眼、I-1 辅助眼单孔装药量 0.6 kg,底板眼单孔装药量 0.45 kg,拱顶区 II 单孔装药量 0.45 kg)。起爆顺序:第一炮爆破掏槽区 I-1 及掏槽两侧区 I-2,之间用 20 段雷管进行孔外延期;第二炮爆破拱顶区 II。现场炮眼布置图见图 2,第一炮起爆网路连接示意图见图 3。图中阿拉伯数字代表雷管段别,罗马数字代表分次起爆区域。

爆破效果:爆破振速集中控制在 0.5~0.7 cm/s 的范围,最大值为 0.75 cm/s,小于要求控制振速。但拱顶区 II 岩石受 I 部掏槽及第一层导洞爆破的双重扰动,在装药过程中,冒落大块岩石的概率达 10%。冒落的岩石虽未造成人员伤亡,但对工人身心健康不利,且岩石冒落拽断孔内雷管,破坏爆破网路,给出渣工作埋下隐患。拱顶区 II 装药前,除耗费 15 min 通风外,还要耗费 20 min 进行“敲帮问顶”去除浮石,起爆前耗费 10 min 进行爆破警戒。此外,采用大段别雷管孔外延期,孔外延期雷管断管率为 5%。

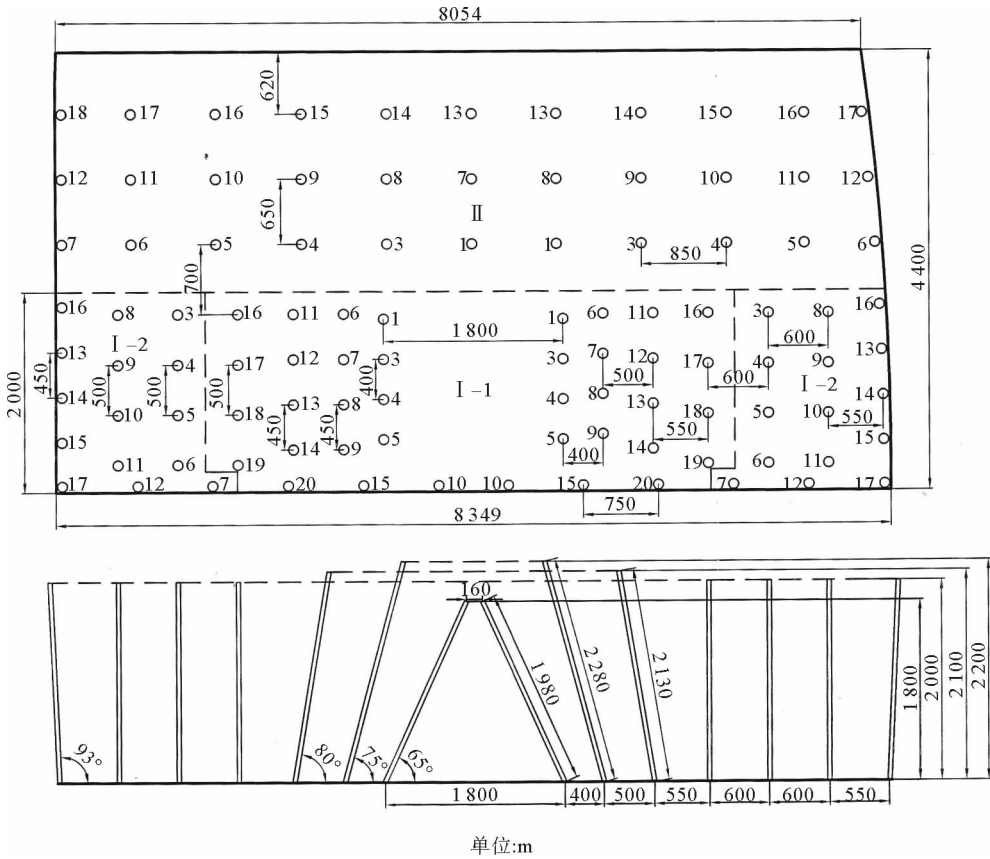


图 2 炮眼布置图

Fig. 2 Hole arrangement

3 优化爆破方案

采用全断面一次起爆是解决以上问题的有效途径。最简单的优化方案是选用高精度延期雷管或数码雷管进行一次爆破,但由于雷管的特殊性,本工程无法改变雷管的类型。此外,爆破现场还试验了如图 4 所示的起爆网路连接图。即只改变拱顶区 II 的孔外延期雷管,从 I-2 连出 18 段雷管作为拱顶区 II 的孔外大段别延期雷管,实现接力起爆。实际效果是由于拱顶区 II 的岩石较破碎,当掏槽区 I-1 爆破完成而拱顶区 II 未起爆前,拱顶区 II 岩石就已发生垮落,导致拱顶区 II 孔内雷管被拽断,接力起爆失败。因此,必须对各爆破参数进行优化,在不使用孔外延期的情况下实现全断面一次起爆。

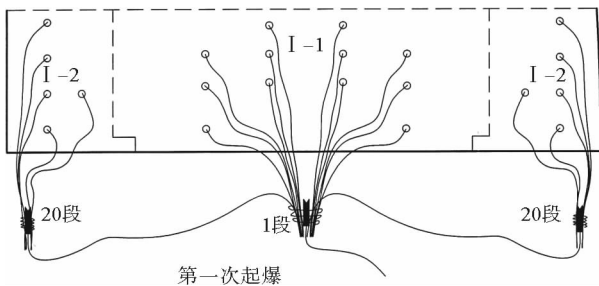


图 3 第一炮爆破网路连接示意图

Fig. 3 First shot blasting network connection diagram

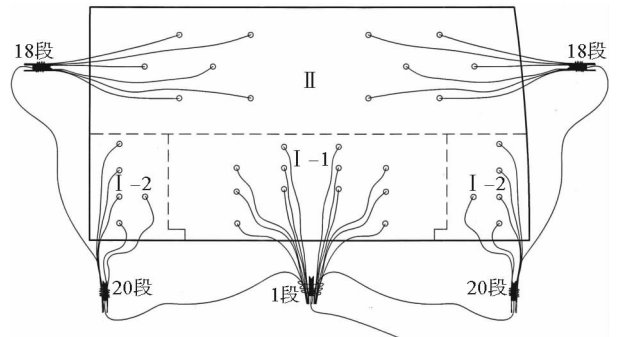


图 4 全断面接力起爆网路连接示意图

Fig. 4 Whole section nonel detonator network connection diagram

3.1 单段最大起爆药量确定

原爆破方案的单段最大起爆药量为 1.2 kg, 爆破振速多集中在 0.5 ~ 0.7 cm/s, 远小于 1.0 cm/s 的振速控制要求, 故可以通过增加单段最大起爆药量来减少起爆次数。单段最大起爆药量根据萨式公式(式 1) 计算。

$$Q_{\max} = R^3 \left(\frac{v}{K} \right)^{\frac{3}{\alpha}} \quad (1)$$

其中: Q_{\max} —单段最大起爆药量, kg; R —爆源与需要保护的建筑物之间的距离, m; 本工程掏槽距测点 $R = 29$ m; v —保护对象所在地质点振动安全允许速度, 取 1.0 cm/s; K, α —与爆破点至计算保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数。

由于车站主体 I 部空腔的存在, 导致萨式公式中 K, α 值无法参考第一层导洞的数值, 故必须对萨式公式重新进行回归, 以确定合理的 K, α 值。根据工程前期测量数据, 采用最小二乘法进行线性回归计算。根据文献[5] 步骤计算, 可得 $K = 58, \alpha = 1.31$ 。根据式(1), $Q_{\max} \approx 2.2$ kg, 远大于原方案单段最大起爆药量 1.2 kg, 故可以增大单段最大起爆药量。

3.2 掏槽区爆破参数优化

对原爆破方案第一炮的大量爆破振速波形图进行分析可知: 掏槽的爆破振速比其他炮眼振速大, 集中在 0.5 ~ 0.7 cm/s, 辅助眼的爆破振动集中在 0.3 ~ 0.4 cm/s 的范围; 第 1 段、第 6 段、第 11 段对应的振速一般超过 0.5 cm/s, 即一级掏槽、二级掏槽、三级掏槽首响孔对应的振速较大; 第 1 段~第 9 段对应的振速比后续起爆的炮眼振速较大, 即一级掏槽和二级掏槽振速比三级掏槽及辅助眼的振速大。

原因分析及优化措施:

1) 掏槽眼爆破时只存在掌子面一个自由面, 岩石夹制作用大, 故爆破振速较大^[6]; 而辅助眼爆破时, 掏槽槽腔已经成型, 为辅助眼爆破提供了新的自由面。自由面数量对爆破振动强度的影响非常明显, 3 个自由面爆破的振动速度是两个自由面爆破的 1/3~2/3, 是单个自由面爆破的 1/6~1/3^[7]。在单段最大起爆药量相等时, 含两个自由面的辅助眼爆破振速较低。因此, 可适当增加辅助眼单段最大起爆药量。同时根据式(2) 重新确定辅助眼单孔装药量。

$$Q_f = \tau \cdot \gamma \cdot L \quad (2)$$

其中: Q_f —辅助眼的单孔装药量, kg; τ —装药系数, 与炮孔间排距及围岩等级有关, 根据前期工程经验, 取 $\tau = 0.2$; γ —每米药卷的炸药质量, 本工程 $\gamma = 1.1$ kg/m; L —炮眼长度, 本工程 $L = 2.0$ m。

经计算 $Q_f = 0.44$ kg, 为方便装药, 辅助眼单孔装药量为 0.45 kg(一卷半炸药)。根据现场试验, 将辅助眼单段最大起爆药量改为 2.7 kg 时, 振速最大值不超过 0.7 cm/s, 故优化后的辅助眼变为 6 个炮孔共用一个段别。同理, 一级掏槽爆破后形成的槽腔为二级掏槽、三级掏槽提供了新的自由面, 故后续起爆的掏槽变为 4 个炮孔共用一个段别, 单孔装药量同原方案, 二级掏槽单段最大起爆药量为 2.4 kg, 三级掏槽单段最大起爆药量 3.3 kg。

2) 三级掏槽的首响孔都位于同列炮孔的最上面, 逐孔爆破时, 下部岩石夹制作用使得爆破漏斗形成困难, 故产生的爆破振速较大。优化后的同列炮孔按“先中间后两边”原则布设, 即同列中段别较小的雷管布设在中间的炮孔, 首先起爆, 可充分利用已爆炮孔提供的补偿空间, 降低振速。中间炮孔爆破后, 为同列上下炮孔提供了新的自由面, 上下炮孔爆破较容易。此外, 为了使后续起爆的掏槽眼自由面充足, 优化后的一级掏槽高度高于后续起爆的掏槽眼。

3) 根据式(3) 计算一级掏槽眼理论装药量。

$$Q = \frac{S_1 L_b q}{N} \quad (3)$$

其中: Q —单个槽孔装药量, kg; S_1 —槽腔平均横断面积(炮眼深度方向), m^2 ; 原方案 $S_1 = 1.176$ m^2 ; L_b —炮眼深度, m; 原方案 $L_b = 1.8$ m; N —装药掏槽眼数, 个; 原方案 $N = 8$ 个; q —炸药单耗, kg/m^3 ; 据统计, 当岩石坚固性系数 $f = 4 \sim 6$ 时, $q = 2.5$ kg/m^3 ; 当 $f = 6 \sim 8$ 时, $q = 3.5$ kg/m^3 , 本工程掏槽区域的 $f = 6$, 故 q 取

3 kg/m³。

经计算 $Q \approx 0.8$ kg, 而实际装药量为单孔 0.6 kg。可见, 一级掏槽眼倾角及炮孔深度较大, 导致爆破的岩石量较大, 而炮孔个数较少, 故爆破较困难, 振速较大。优化后的一级掏槽眼倾角缩小至 55°, 炮孔深度 1.5 m, 炮孔个数增加到 10 个, 间距增加到 2.2 m, 代入式(3)可得, $Q \approx 0.7$ kg。一级掏槽眼单孔装药量 0.6 kg, 基本满足理论要求。同时, 根据多级楔形掏槽减振机理^[8]对后续起爆的掏槽眼炮孔深度及倾角进行优化。一级掏槽眼爆破产生的槽腔为二级掏槽眼爆破提供膨胀空间, 二级掏槽眼产生的未作用于岩石的那部分爆炸能量向空气自由面溢出, 从而可以降低爆破振动, 故二级掏槽炮眼的倾度及深度较一级掏槽眼都适当加大。后续爆破的掏槽眼同样优化。因此, 槽腔最终深度不宜在二级掏槽眼爆破后形成, 宜在三级掏槽眼爆破后形成, 才更有利于降低爆破振速, 即三级掏槽眼深度应该比二级掏槽眼深度大。优化后的掏槽眼参数为: 一级掏槽眼炮孔深度 1.7 m, 炮孔倾角 60°, 炮孔个数 10 个; 二级掏槽眼炮孔深度 2.0 m, 炮孔倾角 75°; 三级掏槽眼炮孔深度为 2.2 m, 炮孔倾角 80°。为缩短三级掏槽与辅助眼眼底间距, 同时将辅助眼炮孔倾角优化为 85°; 其他各爆破参数不变。

3.3 炮孔间距优化

根据公式(4), 计算第一炮的理论炸药单耗。

$$q = 1.4 \sqrt{f/s} \quad (4)$$

其中: s —开挖断面面积, $s > 18$ m² 时, 按 18 m² 计; 其他参数含义同前文。

经计算, $q = 0.81$ kg/m³, 而实际第一炮的 $q = 1.31$ kg/m³。虽然控制爆破由于“多打眼、少装药”, 炸药单耗较大^[9], 但根据前期施工经验可知, 第一炮的炸药单耗合理值宜在 1.0 ~ 1.1 kg/m³ 范围。故应增加炮孔间排距。炮孔间排距增加不仅可以降低炸药雷管单耗, 而且减轻工人劳动量, 节约爆破用时。将原方案中 I-1、I-2 区的炮孔间距优化为: 一级掏槽与二级掏槽间距增大至 450 mm; 辅助眼与周边眼炮孔间距增大至 600 mm; 其他炮孔间距增大至 650 mm。将优化后的各参数代入式(4), 计算得 $q = 1.02$ kg/m³。

从前期爆破情况可知, 拱顶区的岩石较破碎, I-1 及 I-2 爆破完成后, I-1 上方的岩石垮落严重, 且拱顶区在掏槽区爆破后才爆破, 此时最小抵抗线方向向下, 爆破可借助重力作用完成。因此, I-1 上方炮孔可适当减少单孔装药量, 拱顶区可适当增大炮孔间距。根据“大孔距小排距”原理^[10]优化拱顶区炮孔间排距。优化后的排距为 600 mm, 排距减小有利于增大爆破漏斗角, 形成弧形自由面, 为岩石受拉伸破坏创造有利条件; 孔距增大至 1 300 mm, 孔距增大减少了钻孔个数。同时, I-1 上方炮孔单孔装药量为 0.3 kg, 其他炮孔单孔装药量仍为 0.45 kg。优化后的炮孔采用梅花形布孔, 更有利于岩石的破碎。拱顶区装药后, 使用炮泥封实, 防止炸药受振动弹离炮孔底部, 造成炮孔利用率低。优化后的炮眼布置图见图 5。

优化后的 5 个爆破循环中, 爆破振速最大值 0.7 cm/s, 小于要求控制振速; 炮孔总数为 84 个, 比钻眼数为 2.31 个/m²; 每爆破循环使用雷管 92 发; 单段最大起爆药量 3.3 kg, 耗用炸药总量为 40.8 kg。同原爆破方案相比, 在爆破循环进尺不改变的情况下, 爆破振动最大值减小了 0.05 cm/s, 每爆破循环炮孔个数减少了 17 个, 减少爆破用时 1 h, 节约雷管 20 发, 炸药 13.35 kg, 消除了分次起爆造成的落石危险, 同时消除了孔外延期雷管断管的可能性, 经济技术效果显著。

4 结论与建议

以消除全断面分次爆破的落石危险为研究重点, 进行爆破方案优化, 取得显著的经济技术效果。得出以下结论:

- 1) 双侧壁导坑法、CRD 法等分部开挖法施工的隧道, 在下层导洞施工时, 应对萨式公式重新进行回归, 确定上层导洞存在下的单段最大起爆药量;
- 2) 计算辅助眼及后续起爆的掏槽眼单段最大起爆药量时, 应考虑掏槽槽腔的存在为后续爆破的炮孔提供了新的自由面, 可适当增加单段最大起爆药量;
- 3) 为降低掏槽区的爆破振速, 多级楔形掏槽宜增加一级掏槽炮眼数目, 三级掏槽眼炮孔深度宜大于二级掏槽;

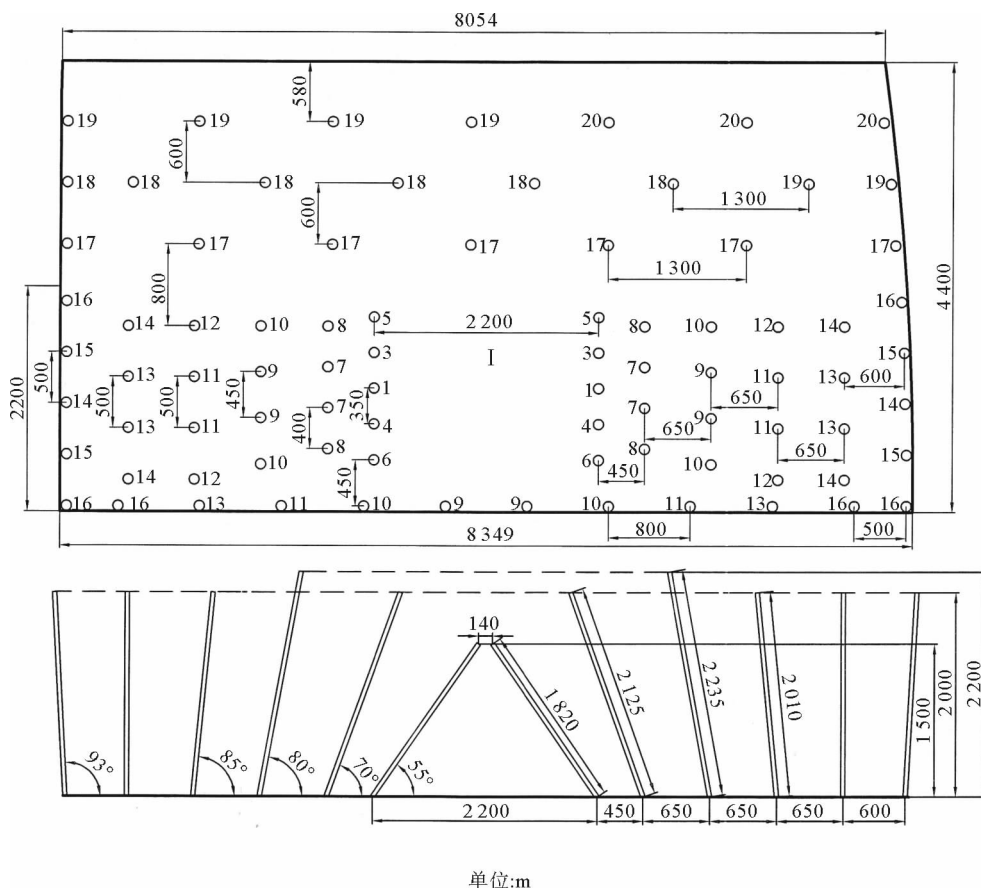


图 5 优化后的炮眼布置图

Fig. 5 The optimized perforation plan

4) 下层导洞拱顶区岩石受上层导洞的爆破扰动,较破碎,且掏槽区爆破后,拱顶区岩石最小抵抗线方向向下,爆破可借助重力作用完成,可根据“大孔距小排距”原理增加炮孔间距,并减少部分炮孔单孔装药量。

本研究对爆破方案各爆破参数的确定过多依据现场试验结果,存在一定局限性。后续研究可通过数值模拟的方法对各爆破参数进行研究,进一步论证现场试验结果,以期更好指导工程实践。

参考文献:

[1]高海宏. 双侧壁导坑法在繁华城区超大断面硬岩车站隧道施工中的应用[J]. 隧道建设, 2008, 28(2): 192-196.
GAO Haihong. Application of double side drift method in construction of extra-large cross-section hard rock station tunnel located in busy urban area[J]. Tunnel Construction, 2008, 28(2): 192-196.

[2]董子龙, 隆卫. 大连地铁兴工街站复合地层超大跨浅埋暗挖施工关键技术[J]. 隧道建设, 2013, 33(6): 489-497.
DONG Zilong, LONG Wei. Key construction technologies for mined metro station tunnels with super-large span and shallow cover located in complex ground; Case study on Xinggong street station of Dalian metro[J]. Tunnel Construction, 2013, 33(6): 489-497.

[3]王航, 韩磊. 浅埋大跨隧道下穿既有公路施工技术[J]. 公路, 2012(8): 267-271.

[4]高海宏. 复杂条件下大跨公路隧道施工中的关键技术[J]. 隧道建设, 2008, 28(1): 51-55.
GAO Haihong. Key construction technology for large-spanned highway tunnels under complex environment[J]. Tunnel Construction, 2008, 28(1): 51-55.

[5]吕涛, 石永强, 黄诚, 等. 非线性回归法求解爆破振动速度衰减公式参数[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1871-1878.
LÜ Tao, SHI Yongqiang, HUANG Cheng, et al. Study on attenuation parameters of blasting vibration by nonlinear regression analysis[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1871-1878.

[6]孙松, 王海亮, 彭志燕. 竖井爆破控制技术[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2015, 34(1): 106-110.

- SUN Song, WANG Hailiang, PENG Zhiyan. The control of flyrock in shaft blasting[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 34(1): 106-110.
- [7] 张建平. 自由面数量对爆破振动规律影响实验研究[J]. 现代矿业, 2009(7): 46-48.
ZHANG Jianping. Experimental research on effects of free surface quantity on blasting vibration laws[J]. Modern Mining, 2009(7): 46-48.
- [8] 何闯, 王海亮, 张超, 等. 中深孔扇形掏槽减振技术在地铁隧道的应用[J]. 国防交通工程与技术, 2015, 30(4): 52-55.
HE Chuang, WANG Hailiang, ZHANG Chao, et al. The application of the medium-length hole in fan-shaped cut vibration reduction technology in subway tunnel[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2015, 30(4): 52-55.
- [9] 杨庆, 王海亮, 王军涛. 城市硬岩隧道下穿砖木结构建筑爆破控制技术[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(1): 199-202.
YANG Qing, WANG Hailiang, WANG Juntao. Blasting control techniques for an urban hard-rock tunnel passing under brick-wood buildings[J]. Modern Tunnelling Technology, 2014, 51(1): 199-202.
- [10] 李长权, 戚文革, 李延春, 等. 宽孔距、小排距爆破技术在大黑山钼矿的应用[J]. 黄金, 2011, 32(7): 36-39.
LI Changquan, QI Wenge, LI Yanchun, et al. Application of long hole distance-short array distance blasting in Daheishan molybdenum mine[J]. Gold, 2011, 32(7): 36-39.

(责任编辑: 吕海亮)

(上接第 78 页)

- [7] 杨珊, 陈建宏, 郭宏斌, 等. 隧道爆破震动影响因素的灰色关联分析[J]. 中国安全科学学报, 21(6): 65-71.
YANG Shan, CHEN Jianhong, GUO Hongbin, et al. Grey relational analysis on influence factors of tunnel blasting vibration [J]. China Safety Science Journal, 21(6): 65-71.
- [8] 周宜, 王海亮, 张祖远, 等. 城市浅埋隧道下穿建筑物的微振动爆破技术研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(1): 89-92.
ZHOU Yi, WANG Hailiang, ZHANG Zuyuan, et al. Study on micro-vibration blasting technology for shallow tunnels crossing underneath existing buildings in urban area[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(1): 89-92.
- [9] 范孝锋, 周传波, 陈国平. 爆破震动影响因素的灰关联分析[J]. 爆破, 2005, 22(6): 100-102.
FAN Xiaofeng, ZHOU Chuanbo, CHEN Guoping. The influential factors of blasting vibration by Grey correlation analysis[J]. Blasting, 2005, 22(6): 100-102.
- [10] 肖新平, 宋中民, 李峰. 灰技术基础及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 26-50.
- [11] 刘思峰, 郭天榜. 灰色系统理论及其应用[M]. 4 版. 北京: 科学出版社, 2008: 44-71.
- [12] 刘思峰, 郭天榜, 党耀国, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 1999: 256-261.
- [13] 中华人民共和国国家标准. GB6722-2014, 爆破安全规程[S].
- [14] 罗正. 城市浅埋大跨隧道爆破震动监测与控制技术研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011: 53-65.
- [15] 李付胜. 城市隧道掘进爆破数值模拟及震动效应控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008: 53-63.
- [16] 赵新涛. 城市岩体开挖爆破震动效应及安全控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010: 111-130.
- [17] 张奇, 白春华, 刘庆明. 爆炸地震波频谱特性研究[J]. 北京理工大学学报(自然科学版), 1999, 19(3): 306-308.
ZHANG Qi, BAI Chunhua, LIU Qingming. Frequency spectrum characteristics of explosion earthquake wave[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Natural Science Edition), 1999, 19(3): 306-308.
- [18] 李孝林, 穆大升, 董鑫, 等. 频率在爆破震害中的作用及其影响因素分析[J]. 工程爆破, 2001, 7(3): 15-18.
LI Xiaolin, MU Taisheng, DONG Xin, et al. Role of frequency in harm of blasting vibration and analysis on its influence factors[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(3): 15-18.

(责任编辑: 吕海亮)