

# 竖井爆破控制技术

孙 松,王海亮,彭志燕

(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:**结合青岛地铁 2 号线竖井施工,针对竖井施工中控制震动和爆破飞石的重要性,提出爆破过程中应该采取的相应措施,即通过控制单位耗药量、单孔药量、选取合理的孔网参数及起爆网路,并通过一定的防护措施有效控制爆破有害效应。按以上措施进行竖井爆破,并用 TC-4850 爆破测振仪在地表进行了监测,将振速控制在 1 cm/s 以内,与此同时,爆破飞石也得到了有效控制。

**关键词:**竖井施工;爆破飞石;震动控制;防护措施

中图分类号:TB41

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2015)01-0106-05

## The Control of Flyrock in Shaft Blasting

Sun Song, Wang Hailiang, Peng Zhiyan

(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:** Based on the shaft construction in Line 2 of Qingdao Metro, some measures were proposed to control vibration and blasting flyrock in the process of blasting in shaft construction. The measures include practicing the control of the unit dose, dose hole, selecting appropriate hole pattern parameters and initiation network. Besides, protective measures were utilized to control the harmful effects of blasting effectively. With the two-fold measures, the velocity of shaft blasting under control amounted to less than 1 cm/s through TC-4850 vibrometer monitoring on the ground. Meanwhile, flying rocks in blasting have been well controlled.

**Key words:** shaft construction; blasting flyrock; vibration control; protective measures

青岛地铁 2 号线一期工程线路全长 25.2 km,均为地下线,途经市北区、市南区、崂山区、李沧区四个区。地铁 2 号线是青岛市乃至山东省内开工建设的第二条地铁线路,也是连接青岛东部、西部及北部的一条骨干线路。青岛徐家麦岛 1 号竖井位于车站东端,香港东路南侧。其西侧为海游路临街商铺,书店、鲜花渔具店及加油站地下油库,店铺房为砖混结构,毛石基础,建造于 20 世纪 90 年代,地下油库为罐式储油罐,与竖井的最小水平距离 41.72 m;南侧为临建活动板房。作业场区分别位于香港东路南北两侧,竖井平面呈矩形,四周边线为弧形,1 号竖井井口尺寸均为 12.30 m×5.20 m,下挖深度约 25 m。井口采用钢筋砼圈梁锁口;井身采用倒挂井壁法施做初期支护。井口上部第四系土层及强风化岩层由人工配合机械挖掘完成,开挖至中风化和微风化岩层后,采用钻爆法施工。爆破震动会对建筑物造成损害,因此需要采取措施控制爆破震动。同时,因本工程地处市区繁华地段,道路交通繁忙,且临近青岛大学,爆破作业时,须采取有效措施控制爆破飞石。

收稿日期:2014-01-06

基金项目:国家自然科学基金项目(10672091)

作者简介:孙 松(1990—),男,山东枣庄人,硕士研究生,主要从事隧道爆破方面的研究。E-mail:466871454@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

## 1 飞石产生的原因

城市隧道施工造成的环境影响是近些年地下工程界研究的热点问题,地表建(构)筑物密集,工程建设周边环境复杂,浅埋暗挖隧道施工不可避免地会对岩土体产生扰动,进而产生较为严重的社会影响<sup>[1]</sup>。爆破飞石是指在爆破作业过程中从爆破点抛掷到空中或沿地面抛掷的杂物、泥土、砂石等物质。爆破飞石的危害主要体现在人员伤亡、建筑物损坏、机器设备破损等方面,而人员伤亡是爆破飞石的最大危害。统计资料表明,我国由于爆破飞石造成的人员伤亡、建筑物损坏事故已经占整个爆破事故的 15%~20%。因此,了解爆破飞石的危害,研究爆破飞石的产生原因,有针对性地开展爆破飞石的预防和干预措施,对防止爆破事故的发生及保障人们的生命财产安全有十分重要的意义<sup>[2]</sup>。

结合青岛地铁 2 号线竖井施工现场情况及文献[1-3]认为,爆破飞石产生的原因主要有:单位耗药量偏大;个别药孔的单孔药量偏大;爆破孔网参数选取不当;防护措施不当。针对以上几点探讨竖井爆破施工中爆破飞石的控制。

## 2 爆破设计方案

### 2.1 爆破设计方案选择

根据竖井自身特点,采用先起爆掏槽孔,再辅助孔,最后周边光爆孔的施工方案。众所周知,市区繁华地段的竖井爆破振动控制及爆破飞石的控制是至关重要的。为保证施工安全,针对周边主要保护目标结构特性,采用短进尺、弱爆破、毫秒延时爆破技术。爆破作业时,采用微量、多孔、多次、多段别爆破法,控制单段最大药量,减轻爆破对围岩的扰动及支护体系的不利影响,同时也减轻对周边建(构)筑物的振动破坏,满足《爆破安全规程》对爆破振动速度的控制要求。在此基础上控制单孔药量及炸药单耗。根据爆破效果和实际地质条件,选择合理的爆破参数,达到控制爆破飞石的目的。

### 2.2 爆破参数选择

#### 2.2.1 炸药的选择

炸药的品种对炸药的爆破振动速度有一定影响,根据工程地质水文条件,本工程掏槽孔、辅助孔均选用防水性能较好的 2 号岩石乳化炸药,药卷直径 32 mm,重 300 g;周边孔采用导爆索配合光爆小直径炸药,药卷直径 20 mm。

#### 2.2.2 雷管和起爆网路选择

竖井爆破的特点是只有一个向上的临空面,每次爆破须先从掏槽孔开始、再向四周扩爆、之后是周边孔爆破。雷管选用毫秒延时导爆管雷管,为防止地震波相叠加产生较大的振动影响,取雷管延时间隔大于 50 ms。在设计爆破网路时必须考虑当第一炮响时,所有炮孔都进入孔内雷管延时阶段,或者说孔外雷管传爆完毕后,第一炮才能响;否则,必须对未传爆完毕的孔外雷管进行有效防护,因为受井内爆破空间限制,爆破飞起的石渣必将回落井内,会砸坏未传爆雷管及导爆管网路,造成盲炮。

#### 2.2.3 掏槽形式的选择

掏槽是爆破成败的关键,也是产生爆破最大振速的主要震源。为了达到减震的目的,选用楔形掏槽,充分利用楔形掏槽的易抛掷特点,最大限度地减轻振动,为后续爆破创造临空面。

#### 2.2.4 孔网参数选择

根据开挖区域的大小、部位、周边环境、工程地质条件等,选择合理的炮孔深度、间距、装药量、爆破网路及起爆顺序等参数。炮孔布置采用线形布孔、线形起爆,注意炮孔装药质量和填塞质量,达到减震、提效的目的。本工程钻爆参数选择<sup>[4]</sup>如下:

1) 孔径  $d=42$  mm。

2) 孔深  $L=1.2$  m。辅助孔、周边孔孔深取 1.2 m;掏槽孔孔深增加 20%,分三排,分别取 1.3, 1.5 和 1.8 m。

3) 掏槽孔 采用楔形掏槽,两排炮孔孔口间距 120 cm,孔底间距 20 cm,可使掏槽孔单孔药量减少,有效

地控制爆破振动速度及爆破飞石。

4) 辅助孔 为使爆渣块度适中, 便于装运, 一般排距  $b=60\sim 90$  cm, 孔距  $a=(1.0\sim 1.2)b$ 。

5) 周边光爆孔 根据  $E/W=0.8$  的原则确定, 孔间距  $E=60$  cm; 光爆层厚度  $W=E/0.8=75$  cm, 取  $W=75$  cm。

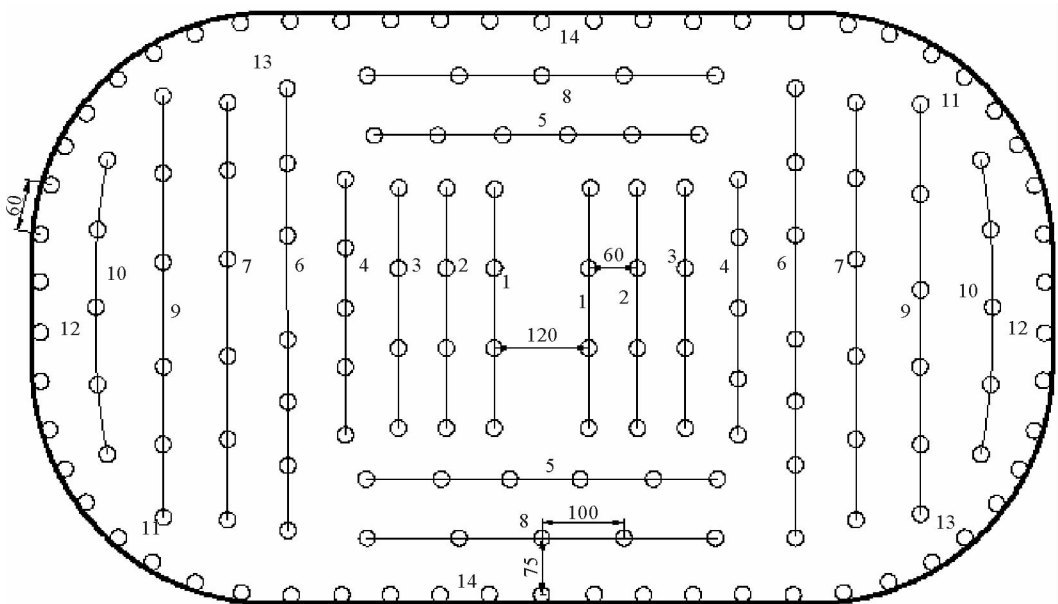
6) 炸药单耗 根据岩性、节理裂隙发育程度以及岩石的可爆性决定炸药单耗, 但在竖井爆破时还应考虑竖井空间的大小、爆破飞石、爆生气体及爆破冲击波对井口防护的影响, 防止岩石冲出井口造成危害。炸药单耗取  $q=0.6\sim 0.8$  kg/m<sup>3</sup>。若单位耗药量过大, 岩石破碎后剩余的爆炸能量就会使破碎的介质获得动能产生抛掷, 出现飞石。剩余的能量越多, 飞散就越严重。单位耗药量选择得当时, 爆破能量仅使介质完全破碎而无剩余的能量。

7) 单孔装药量计算

周边孔: 单孔装药量参照光面爆破经验确定, 线装药密度  $q_1=0.15\sim 0.25$  kg/m, 取  $q_1=0.2$  kg/m, 单孔装药量  $q=q_1\times L=0.24$  kg。其他炮孔单孔装药量根据炮孔的装药量系数进行计算:  $q=q_1\times L\times\eta$ 。其中:  $q$ —单孔装药量, kg;  $q_1$ —炸药的线装药密度, 直接采用 32 药卷时, 取 0.78 kg/m;  $L$ —炮孔深度, m;  $\eta$ —装药系数, 根据岩石的坚固系数  $f=3\sim 8$ , 掏槽孔的装药系数取 0.55~0.65; 辅助孔的装药系数取 0.45~0.55。所以掏槽孔的单孔装药量  $q=0.78\times 1.4\times 0.55=0.6$  kg, 取 0.6 kg; 辅助孔的单孔装药量  $q=0.78\times 1.2\times 0.45=0.42$  kg, 取 0.4 kg。

### 2.3 炮孔布置方法

炮孔布置顺序: 先布置掏槽孔, 再布置周边孔, 最后布置辅助孔。掏槽孔布置在开挖断面的中心位置, 周边孔布置在开挖断面的设计线附近, 周边孔的孔口距离开挖边线 10 cm, 以利于钻孔, 钻孔时略向外倾斜, 孔底落在同一平面上, 孔底超出设计边线 10 cm, 布置完周边孔后, 再布置最靠近周边孔的一圈辅助孔, 其余的辅助孔从掏槽孔向四周均匀布置。炮孔布置图如图 1 所示。装药参数表如表 1 和表 2 所示。



注: 图中数字表示响炮顺序。数字 1, 2, 3 所对应的炮眼分别为一级掏槽眼、二级掏槽眼、三级掏槽眼。1 炮眼深度为 1.3 m, 2 炮眼深度为 1.5 m, 3 炮眼深度为 1.8 m。孔内为 12 段, 孔外相邻数字间用 5 段延时。

图 1 炮孔布置图

Fig. 1 Holes layout diagram

### 2.4 装药结构与填塞

掏槽孔和辅助孔采用反向连续装药结构; 周边孔采用竹片、导爆索间隔不耦合装药结构, 底部药量适当

加强。为了确保爆破效果,炮孔的填塞长度应不小于间排距或底部抵抗线长度。炮孔堵塞长度过小,或堵塞质量不好时,高温高压的爆炸气体中夹有很多石块冲出炮孔,形成冲炮,产生飞石<sup>[1]</sup>。装药结构如图 2 所示。

表 1 徐家麦岛 1 竖井爆破参数表

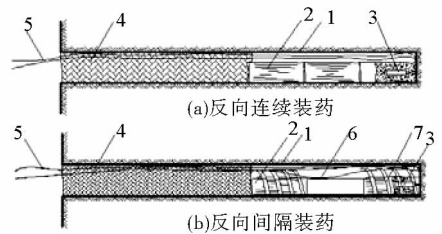
Tab. 1 Shaft blasting parameters in Alex Maidao

名称	数量	孔距/m	排距/m	孔深/m	单孔药量/kg	单响药量/kg	孔外雷管段别	孔内雷管段别
一级掏槽孔	8	0.6	1.2	1.3	0.5	0.9	5	12
二级掏槽孔	8	0.6	0.6	1.5	0.5	6.0	5	12
三级掏槽孔	8	0.6	0.6	1.8	0.6	12.0	5	12
辅助孔	66	0.7~1.0	0.6~0.9	1.2	0.4	12.0	5	12
周边孔	58	0.6	0.75	1.2	0.3	7.8	5	12

表 2 徐家麦岛 1 竖井爆破参数表(续)

Tab. 2 Shaft blasting parameters in Alex Maidao (plus)

项目	数量	项目	数量
开挖面积/m <sup>2</sup>	63.96	炸药用量/kg	56.4
平均每循环进尺/m	1.2	雷管用量/发	178
每循环爆破石方/m <sup>3</sup>	76.75	钻孔量/个/m <sup>2</sup>	2.31
炮孔总数/个	148	钻孔量/个/m <sup>3</sup>	1.92
钻孔总长/m	185.6	单位耗药量/(kg/m <sup>3</sup> )	0.78



1—炮眼壁; 2—炸药; 3—雷管; 4—炮泥; 5—脚线;  
6—竹条和导爆索; 7—绑绳

图 2 装药结构

Fig. 2 Schematic charge

### 2.5 起爆方式及顺序

起爆方式采用毫秒延时网路。根据现场实践,延时时间取 50 ms<sup>[5]</sup>。起爆顺序为:先起爆掏槽孔,形成临空面,再起爆辅助孔,最后起爆周边光爆孔。理论上孔内延时可以有效防止导爆管网路被破坏,而且对控制振动速度具有较好的作用,但考虑到工人受教育水平较低,决定采用孔外延时。孔内大段别,孔外小段别。本工程孔内全用的 15 段,孔外用 5 段延时。两边对称起爆,一方面有利于岩石的破碎,另一方面爆后石渣相对集中在竖井中央便于装运。

### 3 防护措施

防止爆破飞石的措施主要是覆盖和遮挡。用于覆盖和遮挡的材料应有较高的弹性和重量,便于固定<sup>[6]</sup>。针对爆破飞石采取的防护措施主要有:

- 1)在炮孔处直接用橡胶条炮被进行覆盖;覆盖时要保护好起爆网路,决不能拉断或压拆导爆线,否则易造成瞎炮。
- 2)对井口整体覆盖以工字钢为骨架的钢板防护,钢板与井口间的间隙可作为高压气体的排泄口;通过炮孔直接覆盖和井口覆盖,在防爆破飞石的同时也降低了空气冲击波的强度,有效地减轻了空气冲击波危害。
- 3)用彩钢板对作业场区进行围挡封闭。

### 4 结论

该竖井周围建筑物较多,爆破环境较差,爆破振动控制要求较高。且竖井爆破施工可能产生飞石,需要采取相应的措施。通过现场施工及振动监测得到以下结论:

- 1)通过采用分段布孔和分级掏槽技术可以有效控制爆破振动速度;
- 2)通过对孔网参数和填塞质量的控制可以有效减少爆破飞石的产生;

3) 根据现场监测数据, 爆破振动控制在  $1 \text{ cm/s}$  以内, 减少对周围居民及建筑的危害。

### 参考文献:

- [1] 张顶立, 李鹏飞, 侯艳娟, 等. 城市隧道开挖对地表建筑群的影响分析及其对策[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(2): 296-302.  
Zhang Dingli, Li Pengfei, Hou Yanjuan, et al. The impact analysis and countermeasures on surface buildings of the city tunnel excavation[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(2): 296-302.
- [2] 张鲁南, 王海亮. 公路路堑深孔爆破方案的优化与实践[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2014, 33(3): 65-68.  
Zhang Lunan, Wang Hailiang. Optimization and practice of blasting program for highway cutting hole[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2014, 33(3): 65-68.
- [3] 叶晓华. 岩石浅孔爆破中飞石控制的关键[J]. 爆破, 1996, 13(4): 27-28.  
Ye Xiaohua. The control key of flying rock on the rock hole blasting[J]. Blasting, 1996, 13(4): 27-28.
- [4] 王海亮. 工程爆破[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008: 10-56.
- [5] 逢焕东, 林从谋, 张金泉. 扇形布孔方式在斜坡开挖爆破中的应用[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2000, 19(1): 51-53.  
Pang Huandong, Lin Congmou, Zhang Jinquan. The application of the sector hole arranging way on slope excavation blasting[J]. Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2000, 19(1): 51-53.
- [6] 杨宝全, 卢琦. 控制爆破产生飞石的原因及其防治[J]. 采矿技术, 2003(4): 76-77.  
Yang Baoquan, Lu Qi. The causes and prevention of controlling the blasting fly-rock[J]. Mining Technology, 2003(4): 76-77.

(责任编辑: 吕海亮)

---

(上接第 91 页)

### 参考文献:

- [1] 李九阳, 王莹, 刘娜. 夹芯复合墙板在水平荷载作用下变形的有限元分析[J]. 工业建筑, 2010, 40(12): 87-89.  
Li Jiuyang, Wang Ying, Liu Na. Finite element analysis of displacement of complex wall cladding in horizontal load[J]. Industrial Construction, 2010, 40(12): 87-89.
- [2] 徐明霞, 姜忻良, 孙明廷. 均布荷载作用下复合墙板的简化计算方法[J]. 山东大学学报: 工学版, 2012, 42(6): 80-85.  
Xu Mingxia, Jiang Xinliang, Sun Mingting. Simplified calculation method under uniform distributed load for composite wall panels[J]. Journal of Shandong University: Engineering Science, 2012, 42(6): 80-85.
- [3] 孙跃东, 孙汉兵, 赵建超, 等. 菱镁轻质墙板基本力学性能试验研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2013, 32(4): 86-90.  
Sun Yuedong, Sun Hanbing, Zhao Jianchao, et al. Experimental study of basic mechanical properties of magnesium lightweight wallboard[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2013, 32(4): 86-90.
- [4] 中华人民共和国国家标准. GB/T23451-2009, 建筑用轻质隔墙条板[S].
- [5] 中华人民共和国国家标准. GB50009-2012, 建筑结构荷载规范[S].
- [6] 胡肖靖, 马克峰. 节能复合墙板的数值分析与试验研究[J]. 华中科技大学学报: 城市科学版, 2008, 25(4): 325-327.  
Hu Xiaojing, Ma Kefeng. Numerical analysis and experimental investigation of the energy-saving composite sandwich panels[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2008, 25(4): 325-327.
- [7] 张波, 马克峰. ANSYS 有限元数值分析原理与工程应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 122-146.
- [8] 崔名相. 内嵌开洞填充墙钢框架承载性能研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2010: 11-16.

(责任编辑: 吕海亮)