

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.03.009

团山隧道水压爆破技术研究

余志奇¹,朱 镕²,柯 波²

(1. 武汉市市政工程设计研究院有限责任公司,武汉 430040;2. 武汉理工大学 资源与环境工程学院,武汉 430070)

摘要: 隧道爆破施工时,常规爆破方法炸药利用率低,产生的粉尘多,对环境污染大。以团山隧道爆破施工为背景,采用水压爆破方案,对隧道采用单侧壁导坑法开挖,并进行爆破方案设计。其中炮孔直径为42 mm;采用单式楔形掏槽;周边眼孔距为40 cm,抵抗线距离为50 cm;辅助眼孔距为100~120 cm,抵抗线距离为80~100 cm;底板眼孔距为60~70 cm,抵抗线距离为50~60 cm;周边采用光面爆破,不良地质及浅埋地段采用微震控制光面爆破,在爆破后对隧道拱顶下沉及水平收敛情况进行监测。结果表明:水压爆破与常规爆破相比能增加炸药能量利用率,增强爆破效果,缩短施工时间,增加经济效益和降低灰尘保护环境,并且由监测结果表明使用水压爆破对隧道围岩的破坏较小,能较好的维持隧道围岩的稳定,保证后续施工安全。

关键词: 隧道爆破;水压爆破;爆破设计;隧道监测

中图分类号: U455.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)03-0050-08

Study on Hydraulic Blasting Technology of Tuanshan Tunnel

YU Zhi-qi¹, ZHU Rong², KE Bo²

(1. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430040, China;

2. School of resources and environmental engineering, Wuhan University of Technology,
Wuhan 430072, China)

Abstract: During tunnel blasting construction, conventional blasting methods have low explosive utilization rate, produce more dust and cause great environmental pollution. In order to improve these shortcomings, taking the Tuanshan Tunnel blasting construction as the background, a hydraulic blasting scheme is adopted. The tunnel is excavated by a single side heading method, and the blasting scheme is designed, in which the blast hole diameter is 42 mm. The single wedge cutting is adopted. The distance between peripheral holes is 40 cm and the resistance line distance is 50 cm. The distance between auxiliary holes is 100~120 cm, and the resistance line distance is 80~100 cm. The distance of holes on the tunnel floor is 60~70 cm, and the resistance line distance is 50~60 cm. The smooth surface blasting is adopted for the periphery, the smooth blasting controlled by microseismic is adopted for unfavorable geology and shallow buried sections, and the settlement and horizontal convergence of tunnel vault are monitored after blasting. Compared with conventional blasting, the results show that hydraulic blasting can increase the energy utilization rate of explosives, enhance the blasting effect, shorten the construction time, increase economic benefits, reduce dust, and protect the environment. The monitoring results show that the hydraulic blasting has less damage to the surrounding rock mass of the tunnel, which can better maintain the stability and ensure the safety of subsequent construction.

Key words: tunnel blasting; water pressure blasting; blasting design; tunnel monitoring

收稿日期:2021-07-15

作者简介:余志奇(1982),男,硕士、高级工程师、主要从事岩土爆破和爆破监测等方面的研究,(E-mail)3333749@qq.com。

通讯作者:柯波(1982),男,博士、讲师、主要从事岩石冲击动力学与爆破等方面的研究,(E-mail)boke@whut.edu.cn。

随着中国经济的飞速发展,对于施工的要求也越来越高,国家大力倡导绿色施工、文明施工。爆炸过程释放的能量仅仅只有20%~30%直接用于岩

石破碎,而其余的能量则以地面振动、空气冲击波、飞石和噪音的形式消散,还会产生大量粉尘^[1]。水压爆破技术有着“三提高一保护”的明显优势^[2],水压爆破能大幅度提高炸药的爆破效率,增加经济效益,有效降低灰尘保护环境。水压爆破与常规爆破相比只是将水袋和炮泥填充到炮眼中,区别在于装药量,除周边眼外其他每个炮眼的装药量少一节炸药。其他方面例如掏槽形式、炮眼分布和数量、钻孔深度、起爆顺序和时间间隔等方面的设计与常规爆破相同^[3,4]。

唐道权通过对复杂环境条件下的井巷掘进采用控制爆破方法,爆破效果得到明显改善^[5]。刘保阳采用浅孔控制爆破技术,有效控制了爆破振动、爆破飞石等灾害,使得 150 000 m³ 的土石方开挖安全完工^[6]。池恩安对某复杂下承式拱肋公路桥认真分析结构特点,采用钻孔爆破和水压爆破的组合爆破方式,成功拆除该桥^[7]。杨军等通过模拟大桥拱座空心立柱的水压爆破过程,来探讨水压爆破的作用机理和作用效果,得到了在钢筋混凝土结构数值模拟中对水压爆破切口的处理方法^[8]。龙宝宾对隧道采用水压爆破,得到水压爆破具有 3 个提高、2 个减少、1 个保护的优点^[9]。马守龙等通过建立箱梁水压爆破计算模型,模拟水压爆破时冲击波传播过程及箱梁结构的破碎过程,对比箱梁注水量为 80%、90%、100% 时的爆破效果,得到箱梁桥面的破碎效果受注水量的影响很大,注水量越少,能量耗散越多,桥面的破碎效果越差^[10]。万嗣鹏等发现在小断面隧道爆破开挖时,采用水压爆破技术能较好的改善爆破效果,形成较好的隧道轮廓^[11]。

上述研究关于水压爆破对隧道围岩的影响程度的研究较少,为了研究水压爆破对隧道围岩的损伤程度,且由于本工程贯穿东湖风景名胜区,为了更好地保护环境和增强爆破效果,因此隧道钻爆施工采用水压爆破。

1 工程概况

东湖通道工程北起二环线水东段主线高架桥,南止于喻家湖路与喻家山北路相交道口,横贯东湖风景名胜区,线路由红庙立交接线桥梁段、东湖隧道段、团山路地面段、团山隧道段与喻家湖路地面段组成,全长 10.634 公里。

本标段北起鲁磨路接 V 标段,起点里程为 DHTDK6+450,过鲁磨路、植物园路与团山路交叉路口后出地面,南止于喻家山北路与喻家湖路交叉路口,止点里程为 DHTDK9+160,全长 2.71 km。标

段内施工任务为隧道与路基,隧道总长约 1.2 km,路基长约 1.5 km;其中隧道含东湖隧道段 500 m,团山隧道 690 m。东湖隧道结构形式为封闭框架、敞口段,采用明挖法施工;团山隧道为小净距双洞分离式隧道,采用矿山法施工。团山隧道南北侧主线采用地面形式,同时将现状喻家湖路(团山路)分为东西两幅进行改造,北侧团山路、南侧喻家湖路与现状线路基本吻合,其中团山隧道进出口设下穿通道。团山隧道存在 IV 级围岩,需要采用爆破法开挖。

2 爆破方案设计

2.1 爆破方案

隧道开挖采用钻孔台架配合风动凿岩机钻孔以及非电毫秒雷管光面爆破技术。

(1) 测量放线

钻孔前测量放样,准确绘出开挖轮廓线及周边眼、掏槽眼和辅助眼的位置,用激光铅直仪控制边线。距开挖面 50 m 处布设中线桩,每 100 m 设置临时水准点。每次测量放线的同时,要对上次爆破断面进行检查,利用隧道开挖断面量测系统对测量数据进行处理。

(2) 钻孔作业

严格按钻爆设计实施,特别是周边眼和掏槽眼的位置、间距及数量。准确定位凿岩机钻杆,使钻孔位置误差不大于 5 cm,保持钻孔方向平行,严禁相互交错。同类炮眼钻孔深度要达到钻爆设计要求,眼底保持在一个铅垂面上。

(3) 周边眼的装药结构

周边眼的装药结构是实现光面爆破的重要条件,严格控制周边眼装药量,采用合理的装药结构,尽量使炸药沿孔深均匀分布,施工时采用不耦合装药结构,不耦合装药系数控制在 1.4~2.0 范围内,详见结构图见图 1。

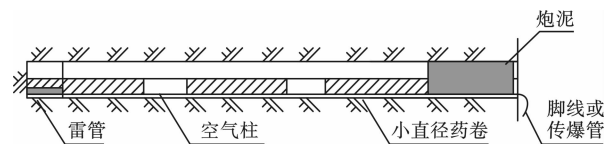


图 1 周边眼空气柱间隔装药结构图
Fig. 1 Structure diagram of air column interval charge in peripheral hole

(4) 围岩爆破

根据岩石强度选用岩石乳化炸药。周边眼采用 $\phi 22 \times 270$ 小药卷,空气柱状装药结构,其余炮眼采用 $\phi 32 \times 200$ 药卷。采用塑料导爆管非电起爆,除

周边眼其余钻孔采用水压爆破。

(5) 微震爆破

隧道周边采用光面爆破,不良地质、浅埋地段采用微震控制光面爆破。微震爆破作业段最大一段允许装药量

$$Q_{\max} = R^3 \times (V_{kp}/K)^{3/a}$$

式中: Q_{\max} 为最大一段爆破药量,kg; V_{kp} 为安全速度;取 $V_{kp}=2$ cm/s; R 为爆破安全距离,m; K 为地形、地质影响系数; a 为衰减系数。

K 、 a 值是针对隧道的具体情况,通过多次试爆进行 K 、 a 值回归分析后确定。根据爆破物距爆心的安全距离要求,并由此推出的每段的最大装药量。

2.2 隧道开挖钻爆设计

隧道开挖施工坚持“弱爆破、短进尺、强支护、早封闭、勤量测”的原则,本隧道钻爆采用水压爆破、小炮、机械或人工开挖,严格控制装药量,以减小对围岩的扰动。

IV级围岩采用单侧壁导坑法开挖。设计每循环进尺为1.26 m,最大单段起爆药量为9.0 kg。

(1) 炮孔直径为: $d=42$ mm。

(2) 掏槽方式采用为单式楔形掏槽。

(3) 周边眼孔距为40 cm,抵抗线距离为50 cm,周边眼沿着巷道轮廓线开口,孔底超出轮廓线10 cm。

(4) 辅助眼孔距为100~120 cm,抵抗线距离为80~100 cm;底板眼孔距为60~70 cm,抵抗线距离为50~60 cm。

具体单侧壁导坑法开挖施工典型断面爆破设计参数表和相关技术指标见表2、3、4、5、6和7,爆破设计布置图如图2,其中孔深和开口角度如图2所示,图中数字编号代表起爆雷管段号。合理设定各段位微差爆破时间,能控制各炮孔按顺序起爆,并且提供充足的自由面,更好的利用炸药能量,提升爆破效果,每段雷管延期时间见表1。其他参数见表2~表7。

表1 雷管各段位延期时间表

Table 1 Delay schedule for each section of detonator

段位	1	3	5	7	9	10	11	12	13
延时/ms	0	50	110	200	310	380	460	550	650

表2 装药系数和单孔装药量表

Table 2 Charge coefficient and single hole charge quantity

类型	长度/m	装药系数	光爆线装药量/(kg·m ⁻¹)	炸药每米质量/kg	单孔装药量/kg
掏槽眼	1.68	0.60		0.78	0.80
辅助眼	1.40	0.50		0.78	0.55
周边眼	1.40		0.15~0.2		0.20
底板眼	1.50	0.55		0.78	0.60

表3 三台阶法开挖左上部分光面爆破参数设计表

Table 3 Design of smooth blasting parameters for the upper left part of excavation by three bench method

部位	序号	雷管段号	炮眼名称	炮眼深度/m	眼数/个	单眼装药量/kg	段装药量/kg	雷管量/发	炮孔延米量/m
左上	1	1	掏槽眼	1.6	8	0.80	6.40	16	12.8
	2	3	辅助眼	1.4	12	0.55	6.60	12	16.8
	3	5	辅助眼	1.4	5	0.55	2.75	5	7.0
	4	7	辅助眼	1.4	12	0.55	6.60	12	16.8
	5	9	辅助眼	1.4	8	0.55	4.40	8	11.2
	6	10	辅助眼	1.4	8	0.55	4.40	8	11.2
	7	11	周边眼	1.4	45	0.20	9.00	45	63.0
	8	12	底板眼	1.5	8	0.60	4.80	8	12.0
	9	13	底板眼	1.5	7	0.60	4.20	7	10.5
	合计				113		49.15	145	161.3

主要经济技术指标:

(1) 断面积:48.08 m²; (2) 预计每循环进尺:1.26 m; (3) 爆破方量:60.58 m³; (4) 炮眼数:113个; (5) 钻孔总延米量:161.3 m; (6) 总装药量:49.15 kg; (7) 雷管用量:145发; (8) 比钻眼数:2.35个/m²; (9) 比钻眼量:2.66 m³; (10) 比装药量:0.81 kg/m³; (11) 单位体积雷管用量:2.39发/m³; (12) 预计炮孔利用率:90%。

表4 三台阶法开挖左下部分光面爆破参数设计表

Table 4 Design of smooth blasting parameters for the lower left part of excavation by three bench method

部位	序号	雷管 段号	炮眼 名称	炮眼 深度/m	眼数/个	单眼装药 量/kg	段装 药量/kg	雷管 量/发	炮孔 延米量/m
左下	1	1	辅助眼	1.4	8	0.55	4.40	8	11.2
	2	3	辅助眼	1.4	7	0.55	3.85	7	9.8
	3	5	辅助眼	1.4	8	0.55	4.40	8	11.2
	4	7	周边眼	1.4	19	0.20	3.80	19	26.6
	5	9	底板眼	1.5	7	0.60	4.20	7	10.5
	6	10	底板眼	1.5	7	0.60	4.20	7	10.5
	合计				56		24.85	66	79.8

主要经济技术指标:

(1)断面积:34.76 m²; (2)预计每循环进尺:1.26 m; (3)爆破方量:43.80 m³; (4)炮眼数:56个; (5)钻孔总延米量:79.8 m; (6)总装药量:24.85 kg; (7)雷管用量:66发; (8)比钻眼数:1.61个/m²; (9)比钻眼量:1.82 m/m³; (10)比装药量:0.57 kg/m³; (11)单位体积雷管用量:1.51发/m³; (12)预计炮孔利用率:90%。

表5 三台阶法开挖右上部分光面爆破参数设计表

Table 5 Design of smooth blasting parameters for the upper right part of excavation by three bench method

部位	序号	雷管 段号	炮眼 名称	炮眼 深度/m	眼数/个	单眼装药 量/kg	段装 药量/kg	雷管 量/发	炮孔 延米量/m
右上	1	1	掏槽眼	1.6	8	0.80	6.40	16	12.8
	2	3	辅助眼	1.4	12	0.55	6.60	12	16.8
	3	5	辅助眼	1.4	5	0.55	2.75	5	7.0
	4	7	辅助眼	1.4	9	0.55	4.95	9	12.6
	5	8	辅助眼	1.4	8	0.55	4.40	8	11.2
	6	9	辅助眼	1.4	11	0.55	6.05	11	15.4
	7	10	辅助眼	1.4	11	0.55	6.05	11	15.4
	8	11	周边眼	1.4	38	0.20	7.60	38	53.2
	9	12	底板眼	1.5	6	0.60	3.60	6	9.0
	10	13	底板眼	1.5	6	0.60	3.60	6	9.0
	合计				114		52.00	146	162.4

主要经济技术指标:

(1)断面积:53.31 m²; (2)预计每循环进尺:1.26 m; (3)爆破方量:67.17 m³; (4)炮眼数:114个; (5)钻孔总延米量:162.4 m; (6)总装药量:52 kg; (7)雷管用量:146发; (8)比钻眼数:2.14个/m²; (9)比钻眼量:2.42 m/m³; (10)比装药量:0.77 kg/m³; (11)单位体积雷管用量:2.17发/m³; (12)预计炮孔利用率:90%。

表6 三台阶法开挖右下部分光面爆破参数设计表

Table 6 Design of smooth blasting parameters for the lower right part of excavation by three bench method

部位	序号	雷管 段号	炮眼 名称	炮眼 深度/m	眼数/个	单眼装药 量/kg	段装 药量/kg	雷管 量/发	炮孔 延米量/m
右下	1	1	辅助眼	1.4	6	0.55	3.30	6	8.4
	2	3	辅助眼	1.4	6	0.55	3.30	6	8.4
	3	5	辅助眼	1.4	6	0.55	3.30	6	8.4
	4	7	周边眼	1.4	8	0.20	1.60	8	11.2
	5	9	底板眼	1.5	6	0.60	3.60	6	9.0
	6	10	底板眼	1.5	6	0.60	3.60	6	9.0
	合计				38		18.70	44	54.4

主要经济技术指标:

(1)断面积:27.54 m²; (2)预计每循环进尺:1.26 m; (3)爆破方量:34.70 m³; (4)炮眼数:38个; (5)钻孔总延米量:54.4 m; (6)总装药量:18.7 kg; (7)雷管用量:44发; (8)比钻眼数:1.38个/m²; (9)比钻眼量:1.57 m/m³; (10)比装药量:0.54 kg/m³; (11)单位体积雷管量:1.27发/m³; (12)预计炮孔利用率:90%。

表7 主要经济技术指标汇总表

Table 7 Summary of main economic and technical indicators

序号	项目	单位	左上	左下	右下	右下	整个断面
1	开挖断面积	m ²	48.08	34.76	53.31	27.54	163.69
2	预计每循环进尺	m	1.26	1.26	1.26	1.26	1.26
3	每循环爆破石方	m ³	60.58	43.80	67.17	34.70	206.25
4	炮眼总数	个	113	56	114	38	321
5	钻孔总延米量	m	161.3	79.8	162.4	54.4	457.9
6	雷管用量	发	145	66	146	44	401
7	炸药用量	kg	49.15	24.85	52.00	18.70	144.70
8	比钻眼数	个/m ²	2.35	1.61	2.14	1.38	1.96
9	比钻眼量	m/m ³	2.66	1.82	2.42	1.57	2.22
10	比装药量	kg/m ³	0.81	0.57	0.77	0.54	0.70
11	单位体积雷管用量	发/m ³	2.39	1.51	2.17	1.27	1.94
12	预计炮眼利用率	%	90	90	90	90	90

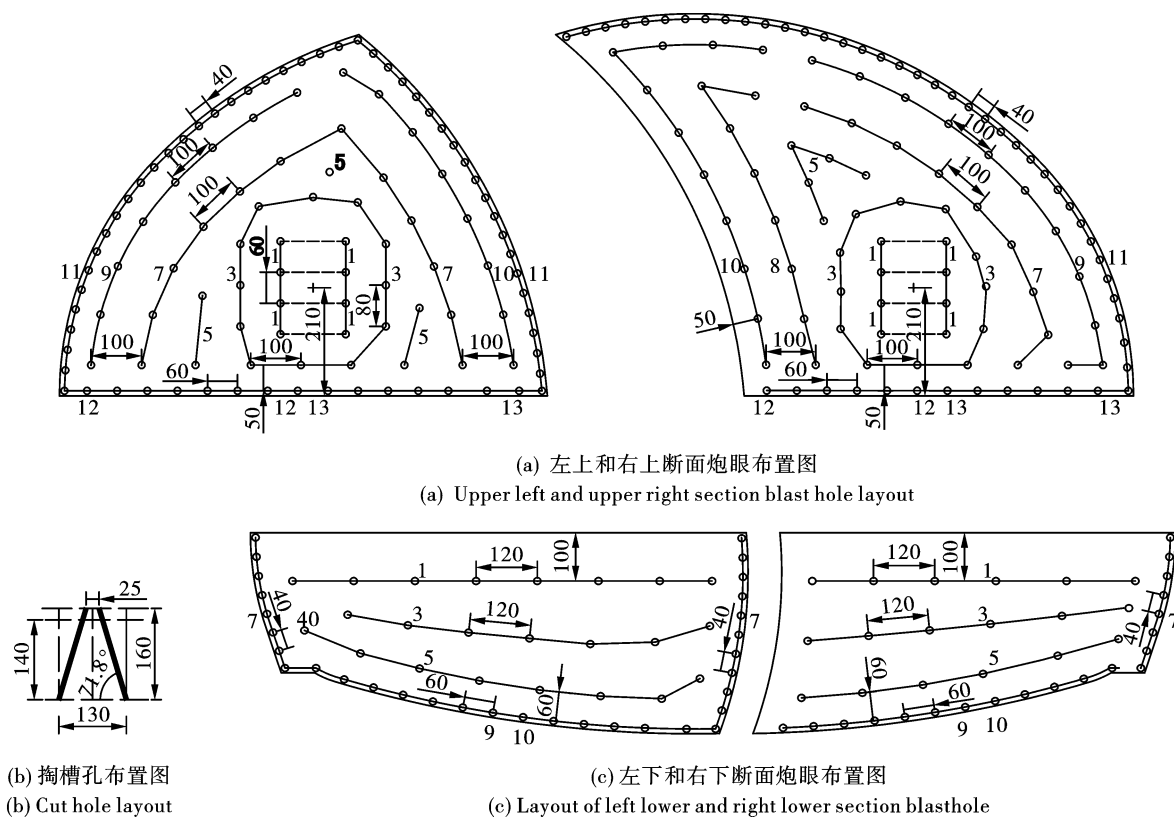


图2 单侧壁导坑法开挖爆破设计图(单位:cm)

Fig. 2 Blasting design for excavation with one side heading method(unit:cm)

3 节能环保水压爆破

本隧道钻爆均采用“水压爆破”新技术,即先把水灌入到特制的塑料袋中,然后把水袋填入炮眼所设计的位置中,装药结构如图3所示。这种技术利用在水中传播的冲击波对水的不可压缩性,使爆炸能量无损失地经过水传递到炮眼围岩上,与无回填堵塞相比充分地利用了炸药能量,有利于岩石破碎,水的雾化还能起到降尘作用^[12]。

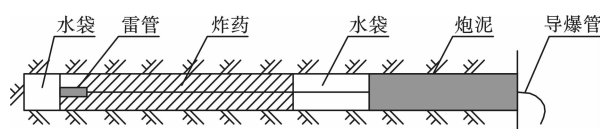


图3 水袋炮泥回填堵塞法爆破图

Fig. 3 Blasting diagram of water bag blasting mud backfill blocking method

3.1 工艺流程

水压爆破与常规爆破相比需要在施工前进行水

袋和炮泥的制作,并且按照水袋-炸药-水袋-炮泥的顺序依次填充炮孔,具体工艺流程见图4。

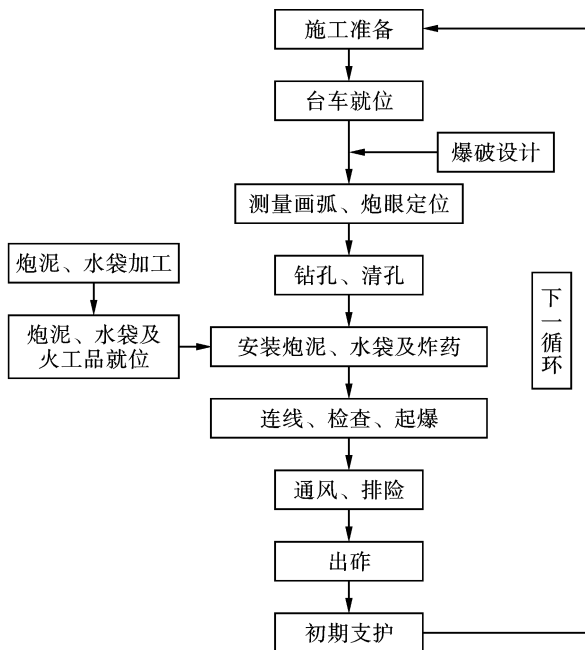


图4 水压爆破工艺流程图
Fig. 4 Process flow chart of water pressure blasting

3.2 水袋制作

在水压爆破技术中,水袋(即装水的塑料袋)须有一定的壁厚,在普遍情况中,水袋由0.88 mm厚的聚乙烯塑料制造,它的直径和炮眼的直径要做到基本一致。

水袋使用KPS-60型水袋自动封装机加工而成,如图5所示。这个仪器是为水压爆破专门研制的封口机,结构简单,操作方便,每小时可制作约700个水袋。



图5 KPS-60型水袋自动封装机
Fig. 5 KPS-60 water bag automatic packaging machine

具体操作:首先连接水管,并用扎圈锁紧为防进

气;打开电源调节温度到220°左右,预热约十分钟;试运转从出水口排除气体;然后把塑料袋套在出水口上,一按电钮水即可冲入袋中,随之自动封口,水袋便加工成。

3.3 炮泥制作

炮泥采用PNJ-A型炮泥机加工而成,如图6所示。这种专门为水压爆破研制的炮泥机,结构简单,操作方便,两个人每小时可制作约500根炮泥。

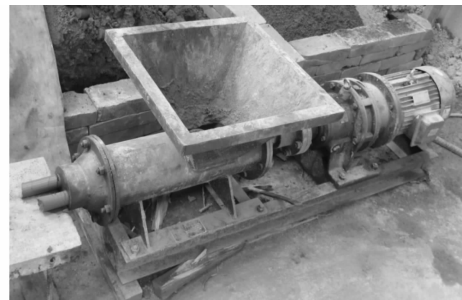


图6 PNJ-A型炮泥机
Fig. 6 PNJ-A clay gun

炮泥原料为土、水、砂,比例为0.75:0.1:0.15,长200 mm,直径35~37 mm,保证塞满钻孔而又不磨破水袋^[13]。炮泥要堵塞到炮眼口,并保证填塞严实。与水袋相邻的第一节炮泥要顺势轻放,不要捣实以免将水袋弄破,从第二节起要捣实直至炮眼口。

炮泥的堵塞还需要注意以下的问题:(1)为了不发生“冲泥”的情况,要对炮泥在炮眼中的长短进行更好的把控。(2)炮泥的长度应该合理的把控在3:4到1:1,不能太短,一定要比水袋的长度更长^[14]。

4 爆破效果

在水压爆破结束后对隧道位移和变形进行监测来评估水压爆破的效果,爆破效果如图7,其中对拱顶下沉监测的目的主要有:(1)通过拱顶沉降位移量测,了解断面的变形状态,判断隧道拱顶的稳定性;(2)根据变形速率判断隧道围岩的稳定程度,为二次衬砌提供合理的支护时机;(3)指导现场设计与施工;(4)防止沉降侵入二衬空间。

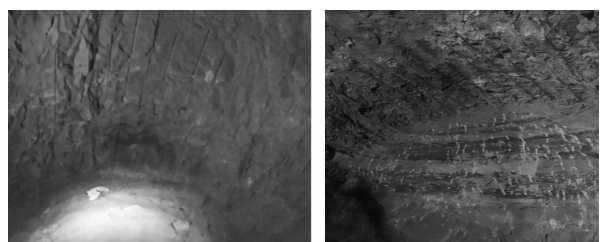


图7 水压爆破后效果图
Fig. 7 Effect picture after water pressure blasting

通过对隧道拱顶下沉及水平收敛情况进行监测,来验证节能环保水压爆破的性能。利用监测获得的数据制作成散点图,利用最小二乘法拟合曲线得到数据的趋势线。如图8所示。

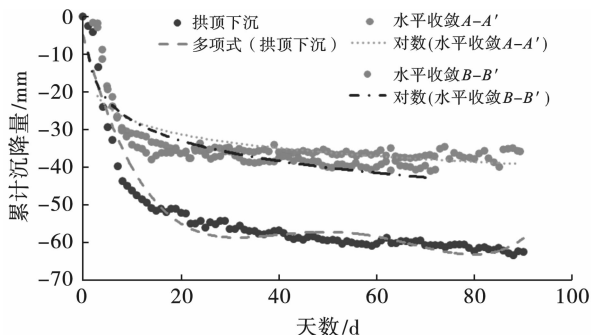


图8 拱顶下沉及水平收敛成果分析图

Fig. 8 Analysis of vault subsidence and horizontal convergence results

如图表明:利用节能环保水压爆破,对隧道围岩的破坏小,使岩石更好的维持稳定性,保证施工安全,减少经济损失。

5 结论

(1) 水压爆破技术工艺较简单,相比传统爆破技术有明显优势。它不仅能提高炸药的利用率,还能使水在爆炸气体膨胀作用下产生“水楔”效应,利于岩石破碎降低大块率,并且能大大降低粉尘对环境的污染。

(2) 节能环保水压爆破能够较好的维持岩石的力平衡,减少对隧道围岩的扰动,使岩石保持稳定的状态,保护施工人员的安全。

参考文献 (References)

- [1] TRIVEDI R, SINGH TN, RAINA AK. Prediction of blast-induced flyrock in Indian limestone mines using neural networks[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(5): 447-454.
- [2] 何广沂, 段昌炎, 荆山, 等. 节能环保工程水压爆破研究与应用[J]. 中国工程科学, 2003(9): 43-48.
- [2] HE Guang-yi, DUAN Chang-yan, JING Shan, et al. Research and application of hydraulic blasting in energy saving and environmental protection engineering[J]. China Engineering Science, 2003(9): 43-48. (in Chinese)
- [3] 纪真. 节能环保水压爆破技术在铁路隧道施工中的应用[J]. 施工技术, 2015, 44(S1): 203-205.
- [3] JI Zhen. Application of energy saving and environmental protection water pressure blasting technology in railway tunnel construction[J]. Construction Technology, 2015, 44(S1): 203-205. (in Chinese)
- [4] 王永丽. 光面爆破在茶坡里隧道中的应用[J]. 铁道建筑技术, 2014(2): 37-39, 51.
- [4] WANG Yong-li. Application of smooth blasting in chapoli tunnel[J]. Railway Construction Technology, 2014(2): 37-39, 51. (in Chinese)
- [5] 唐道权. 城镇复杂环境下井巷掘进控制爆破[J]. 采矿技术, 2018, 18(5): 127-128.
- [5] TANG Dao-quan. Controlled blasting of roadway excavation in complex urban environment[J]. Mining Technology, 2018, 18(5): 127-128. (in Chinese)
- [6] 刘保阳, 马元军. 复杂环境城镇浅孔控制爆破技术研究[J]. 采矿技术, 2017, 17(6): 96-98
- [6] LIU Bao-yang, MA Yuan-jun. Study on shallow hole controlled blasting technology in towns with complex environment[J]. Mining Technology, 2017, 17(6): 96-98. (in Chinese)
- [7] 池恩安. 下承式80m拱肋公路桥组合爆破拆除技术[J]. 爆破, 2010, 27(1): 72-75.
- [7] CHI En-an. Combined blasting demolition technology of through 80 m arch rib highway bridge[J]. Blasting, 2010, 27(1): 72-75. (in Chinese)
- [8] 杨忠华, 杨军, 陈大勇. 混凝土拱座空心立柱水压爆破数值模拟研究[J]. 爆破, 2010, 27(4): 70-73.
- [8] YANG Zhong-hua, YANG Jun, CHEN Da-yong. Numerical simulation study on Hydraulic Blasting of concrete arch hollow column[J]. Blasting, 2010, 27(4): 70-73. (in Chinese)
- [9] 龙宝宾, 王齐, 严少洋. 水压爆破施工工艺在隧道中的实际应用[J]. 工程建设, 2019, 51(6): 74-77, 83.
- [9] LONG Bao-bin, WANG Qi, YAN Shao-yang. Practical application of hydraulic blasting construction technology in tunnel[J]. Engineering Construction, 2019, 51(6): 74-77, 83. (in Chinese)
- [10] 马守龙, 吕闹, 汪海波, 等. 非等厚钢筋混凝土箱梁水压爆破拆除研究[J]. 爆破, 2019, 36(2): 99-104.
- [10] MA Shou-long, LV Nao, WANG Hai-bo, et al. Study on hydraulic blasting demolition of non equal thickness reinforced concrete box girder[J]. Blasting, 2019, 36(2): 99-104. (in Chinese)
- [11] 万嗣鹏, 陶铁军, 陈二平, 等. 小断面隧道快速掘进爆破方案优化研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(11): 178-183.
- [11] WAN Si-peng, TAO Tie-jun, CHEN Er-ping, et al. Optimization of blasting scheme for rapid excavation of small section tunnel[J]. China Mining, 2020, 29(11): 178-183. (in Chinese)
- [12] 崔建文. 节能环保水压爆破在公路隧道中的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2017, 13(9):

- 270-272.
- [12] CUI Jian-wen. Research on application of energy saving and environmental protection hydraulic blasting in highway tunnel[J]. Highway Transportation Technology (Application Technology Edition), 2017, 13 (9): 270-272. (in Chinese)
- [13] 王德荣. 水压爆破控制技术在地铁施工中的应用[J]. 建筑技术开发, 2018, 45(23): 83-84.
- [13] WANG De-rong. Application of hydraulic blasting control technology in subway construction [J]. Architectural Technology Development, 2018, 45(23): 83-84. (in Chinese)
- [14] 曹会栋. 节能环保水压爆破技术在隧道施工中的应用[J]. 施工技术, 2018, 47(S4): 1288-1290.
- [14] CAO Hui-dong. Application of energy saving and environmental protection water pressure blasting technology in tunnel construction [J]. Construction Technology, 2018, 47(S4): 1288-1290. (in Chinese)

英文编辑:陈东方

(上接第25页)

参考文献 (References)

- [1] MISHRA K B, WEHRSTEDT K D. Underground gas pipeline explosion and fire: CFD based assessment of foreseeability [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2015, 24: 526-542.
- [2] YANG H N, CHEN J H, CHIU H J, et al. Confined vapor explosion in Kaohsiung City A detailed analysis of the tragedy in the harbor city [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 41: 107-120.
- [3] CHEN C H, SHEN Y N, WANG H Y. Case analysis of catastrophic underground pipeline gas explosion in Taiwan [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 65: 39-47.
- [4] JI T C, QIAN X M, YUAN M Q, et al. Case study of a natural gas explosion in Beijing, China [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 49: 401-410.
- [5] YIN W T, FU G, YANG C, et al. Fatal gas explosion accidents on Chinese coal mines and the characteristics of unsafe behaviors: 2000-2014 [J]. Safety Science, 2017, 92: 173-179.
- [6] HAO Zhou, DILUM Fernando, VAN Thuan Nguyen, et al. The bond behaviour of CFRP-to-concrete bonded joints under fatigue cyclic loading: An experimental study [J]. Construction and Building Materials, 2020. doi. org/10.1016/j. conbuildmat. 2020. 121674
- [7] R Al-Rousan, M Issa, H Shabila. Performance of reinforced concrete slabs strengthened with different types and configurations of CFRP [J]. Composites Part B, 2012, 43(2): 510-521.
- [8] RAJAI Al-Rousan. Behavior of circular reinforced concrete columns confined with CFRP composites [J]. Procedia Manufacturing, 2020, 44: 623-630.
- [9] ZHEN H, YING K Z, JI W Z, et al. Punching shear behaviour of concrete slabs reinforced with CFRP grids [J]. Structures, 2020, 26(1): 617-625.
- [10] HASAN Elci. Seismic strengthening of improperly repaired reinforced concrete columns using CFRP confinement [J]. Structures, 2020, 28: 266-275.
- [11] RAMI H Haddad, EMAD M Yaghmour. Side NSM CFRP strips with different profiles for strengthening reinforced concrete beams [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 32, 101772.
- [12] 张军伟, 王廷彦. CFRP 布加固钢筋混凝土短梁受弯性能试验研究 [J]. 混凝土, 2020, 371(1): 31-36.
- [12] ZHANG Jun-wei, WANG Ting-yan. Experimental study on the flexural performance of RC short beam strengthened by CFRP sheets [J]. Concrete, 2020, 371(1): 31-36. (in Chinese)
- [13] 杜永峰, 杜进府. 基于压电智能骨料的套筒灌浆料早期强度监测 [J]. 压电与声光, 2020, 42(1): 142-148.
- [13] DU Yong-feng, DU Jin-fu. Early strength monitoring of sleeve grouting material with piezoelectric smart aggregate [J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2020, 42(1): 142-148. (in Chinese)
- [14] XU K, DENG Q S, CAI L J, et al. Damage detection of a concrete column subject to blast loads using embedded piezoceramic transducers [J]. Sensors, 2018, 18(5): 2-16.
- [15] 周 宏. 利用压电波动法的混凝土结构损伤识别试验研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2009.
- [15] ZHOU Hong. Experimental study on damage identification of concrete structures using piezoelectric wave dynamic method [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University, 2009. (in Chinese)
- [16] KONG Q Z, FENG Q, SONG G B. Water presence detection in a concrete crack using smart aggregates [J]. International Journal of Smart and Nano Materials, 2015, 6(3): 149-161.

英文编辑:柯 波