

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.012

丰店-彭店水库连通应急引水工程 小断面隧洞爆破技术*

李建林¹, 黄露¹, 赵逢泽², 许霄¹, 李桐², 陈明²

(1. 湖北水总水利水电建设股份有限公司, 武汉 430056; 2. 武汉大学 水利水电学院, 武汉 430072)

摘要: 水利工程中小断面特坚硬岩隧洞的开挖往往存在着施工难度大、开挖效率低的问题。基于丰店-彭店水库连通应急引水工程, 研究了小断面特坚硬岩隧洞开挖钻孔爆破方案, 开展了不同掏槽爆破方案的现场试验, 提出了联合使用多空孔直孔掏槽爆破与空气间隔装药光面爆破技术方案, 并确定了具体的钻孔爆破参数。现场应用效果表明: 采用多空孔直孔掏槽技术及空气间隔装药光面爆破技术相结合的方案, 隧洞开挖成型效果良好, 开挖轮廓面较为平整, 基本无欠挖, 最大超挖约 20 cm, 实现了该小断面特坚硬岩引水隧洞的安全高效开挖。

关键词: 引水工程; 小断面隧洞; 爆破; 直孔掏槽; 空气间隔装药

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)01-0083-04

Blasting Technology of Small Section Tunnel in Fengdian-pengdian Reservoir Connected Emergency Diversion Project

LI Jian-lin¹, HUANG Lu¹, ZHAO Feng-ze², XU Xiao¹, LI Tong², CHEN Ming²

(1. Hubei Shuizong Water Resources and Hydropower Construction Co., Ltd., Wuhan 430050, China;
2. School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Excavation of medium and small section extra-hard rock tunnels in water conservancy projects is often accompanied by difficulties in construction and low excavation efficiency. Based on the Fengdian-Pengdian reservoir connected emergency water diversion project, the drilling blasting scheme for the excavation of small-section extra-hard rock tunnel was studied. The field tests of different cutting blasting schemes were carried out and the technical scheme of combining multi-hole straight hole cutting blasting with air interval charging smooth blasting was proposed, and the specific drilling blasting parameters were determined. The field application results show that the combination of multi-hole straight hole cutting technology and air interval charge smooth blasting technology has good excavation forming effect, relatively flat excavation contour surface, basically no underbreak, and the maximum overbreak is about 20 cm, which realizes the safe and efficient excavation of the small section extra-hard rock diversion tunnel.

Key words: diversion works; tunnel with small cross section; blasting; burn cut; air interval charge

为均衡水资源分布, 提高水资源利用率, 近年来

我国建设了众多的引水工程。中小型引水工程建设中往往面临着小断面引水隧洞的开挖, 这类隧洞工程往往建设规模较小、施工作业面狭窄、施工难度大, 尤其是开挖坚硬隧洞岩体时, 岩体受围岩夹制作用强, 开挖效率较低。高效环保的爆破开挖技术是小断面硬岩隧洞重点研究内容之一。

小断面硬岩隧洞爆破开挖时, 爆破自由面少且

收稿日期: 2021-09-13

作者简介: 李建林(1965-), 男, 大学本科, 高级工程师, 主要从事水利水电工程施工组织管理研究, (E-mail) 252801327@qq.com。

通讯作者: 黄露(1984-), 女, 大学本科, 高级工程师, 主要从事水利水电工程施工组织管理研究, (E-mail) 874231794@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51779193)

小,常通过掏槽来增加爆破自由面,但不同的掏槽形式产生的爆破效果也存在较大差异^[1-3]。杨玉银等^[4]的研究表明合适的掏槽方式可大幅提高爆破开挖单循环进尺。欧明鑫等通过数值模拟对比了小空孔九孔直孔掏槽、大空孔单螺旋掏槽、三对孔水平楔形掏槽等掏槽型式的掏槽效果^[5]。温贺与刘泽等结合硬岩隧洞现场开挖试验指出掏槽部位增设空孔可提高掏槽爆破效率^[6,7]。Chakraborty 和 Jethwa 指出掏槽爆破方式的选择应结合开挖断面的节理分布特性^[8]。为降低爆破对围岩的损伤以及提高轮廓成型效果,往往采用轮廓爆破技术,且主要是光面爆破技术^[9]。传统的光面爆破技术,利用导爆索起爆炮孔内的炸药,操作工序较多,一般还要求使用小直径的成品炸药卷。为了进一步简化工序,同时达到相同的轮廓成型效果,在隧洞施工过程中越来越多的使用空气间隔光面爆破技术。Moxon 等通过室内试验探讨了空气间隔装药爆破的岩体破坏机理^[10],及其在轮廓爆破中的应用前景。Lou 等分析了空气间隔装药爆破的冲击波形成及传播规律^[11],研究表明空气间隔装药爆炸荷载分布均匀,作用时间更长,对炮孔壁的冲击作用较耦合装药弱。谢圣权综合采用空气间隔光面爆破^[12],M型掏槽爆破等技术,取得了良好的轮廓开挖成型效果,光爆半孔率接近100%。朱荣华与杨仁树等对比了隧洞开挖过程中空气间隔装药光面爆破与常规光面爆破开挖效果^[13,14],结果表明采用空气间隔装药即可保证获得良好开挖轮廓,同时可极大降低施工成本,经济效益可观。但目前小断面硬岩隧洞光面爆破存在爆破单耗高、炮孔利用率低、成型效果一般等问题。

综合上述分析可知,掏槽及轮廓爆破方式对小断面硬岩隧洞爆破施工效率有显著影响。本文结合丰店-彭店水库连通应急引水工程隧洞爆破施工,研究了空气间隔装药爆破技术与多空孔直孔掏槽技术在小断面特坚硬岩隧洞爆破施工中的应用。

1 工程概况

丰店-彭店水库连通应急引水工程位于湖北省大悟县,地处鄂东北部鄂豫边界大别山西端南麓。该工程的主要任务是联通丰店水库和彭店水库。丰店水库和彭店水库均是以灌溉为主,兼顾防洪、供水、发电等综合效益的中型水库,其中丰店水库溢洪次数较多,其水量没有得到充分利用,而彭店水库水源不足,存在供水安全问题。丰店-彭店水库连通引水工程,就是通过工程措施,在雨量较为丰沛且丰店水库水位较高的情况下,尽量减少丰店水库溢洪,将

丰店水库的水引入彭店水库。

引水工程设计输水流量为 $5\text{ m}^3/\text{s}$,属于Ⅲ等工程。主要建筑物包括:应急抗旱泵站、引水隧洞工程(进水渠、塔式进水口、引水隧洞、出口箱涵、出口消力池、明渠)、河道段等工程部分组成,工程永久性主要建筑物为3级,次要建筑物为4级,临时工程为5级。

工程区域内经火成岩的大面积侵入,并进行变质作用,自燕山运动以后未受到大规模构造活动的影响,地壳处于上升剥蚀阶段,区内构造活动不明显,区域稳定性好。隧洞岩体以片麻岩为主,岩体呈块状,层理不明显,围岩主要为Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ类围岩,局部岩体为Ⅰ类,岩体单轴抗压强度100 MPa以上。

引水隧洞工程总长3340 m,隧洞典型剖面如图1所示,断面面积约 10 m^2 ,根据隧道分类标准,属于小断面隧洞。该隧洞围岩比较完整,主要岩体呈微风化,为坚固的片麻岩,根据普氏岩石分类,大部分隧洞围岩属于Ⅺ~Ⅻ级特坚石,隧洞岩石的密度、强度特征、波阻抗及内聚力等相关参数较高,爆破破岩较困难。断面积较小,采用钻孔爆破全断面开挖,开挖的质量及速度,直接影响到工程的进度及效益,而隧洞开挖质量及进度,关键的影响因素是工程地质条件与钻孔爆破方案。

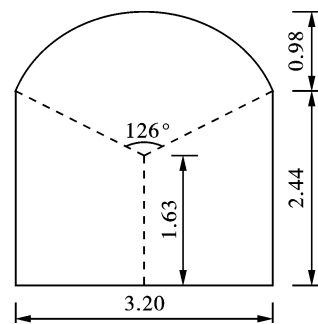


图1 隧洞断面示意图(单位:m)

Fig. 1 Tunnel section diagram(unit:m)

2 钻孔爆破方案

水利工程隧洞钻孔爆破施工,爆破孔通常分为轮廓孔、掏槽孔及崩落孔。根据现场实际施工条件,采用手风钻钻孔,直径32 mm、长度20 cm、总量200 g规格的2#岩石乳化炸药,循环进尺设计为1.8 m,钻孔直径42 mm,孔深2.0~2.2 m。隧洞掘进爆破效果主要受轮廓爆破及掏槽爆破效果控制。

2.1 掏槽爆破方案

掏槽孔布置在隧洞开挖断面的中下部。掏槽孔按布孔形式通常可分为楔形掏槽、锥形掏槽和直孔

掏槽,其爆破效果直接影响隧洞开挖循环进尺。丰店-彭店水库连通应急引水工程隧洞,因断面较小,主要考虑使用直孔掏槽。施工过程中,因无大型钻孔设备,采用了小直径空孔。隧洞开挖过程中,结合现场生产性爆破开挖开展现场试验,对比分析了四角柱状掏槽直孔掏槽及多空孔直孔掏槽爆破效果。

通过对不同的布孔方式进行现场试验发现,采用四角柱状掏槽,如图 2(a)所示,包括 1 个空孔、8 个掏槽孔,分两段起爆,每次的进尺约为 1.0 ~ 1.2 m,炮孔利用率不足 60%,爆破掏槽效果差。

为提高在小断面、特坚硬隧洞岩体开挖中的掏槽效果,在四角柱状掏槽爆破效果分析的基础上,采用了增加空孔的技术措施,采用多空孔直孔掏槽技术,如图 2(b)所示,包含 1 个主掏槽孔、8 个辅助空孔、4 个辅助掏槽孔,分为三段爆破掏槽,中心掏槽孔与周围空孔间距为 10 cm,与 MS3 段辅助孔间距为 25 cm,与 MS5 段辅助孔间距为 38 cm。试验表明该技术循环进尺可达 1.8 m 以上,炮孔利用率可达 90% 以上,开挖效率较高。引水隧洞施工过程中,主要采用多空孔直孔掏槽技术。

2.2 轮廓爆破方案

隧洞开挖轮廓爆破一般采用传统的光面爆破技术,即采用小直径药卷进行不耦合装药并利用导爆索起爆炮孔中的炸药。但是在丰店-彭店水库连通

应急引水工程项目,难以获得小直径爆破孔传统轮廓爆破使用的 $\phi 25$ mm 炸药,导爆索也难以采购。而采用大直径药卷进行空气间隔装药并利用导爆雷管起爆代替传统的轮廓爆破方案,不仅能解决无法获得小直径药卷的问题,同时也可取得与采用传统光面爆破同等的半孔率或开挖平整度指标^[13]。

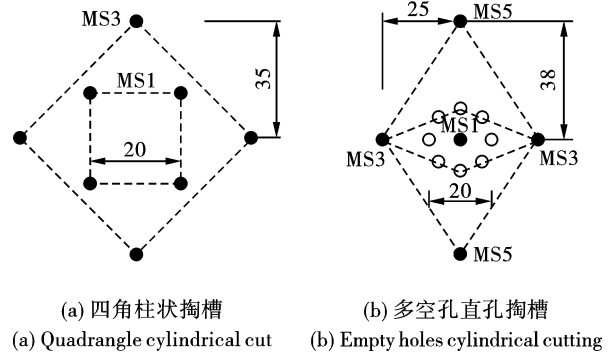


图 2 掏槽方式示意图(单位:cm)

Fig. 2 Schematic diagram of cutting method(unit:cm)

基于上述原因,该工程选用空气间隔装药光面爆破技术。根据轮廓孔的部位、岩体的条件的不同,共设计了四种不同的装药结构。其中底板部位轮廓孔装药结构与崩落孔一致,侧墙孔内装药较崩落孔少 2 节炸药,圆弧段孔内装 3 ~ 4 节炸药,堵塞长度均为 20 cm,侧墙与圆弧段装药结构分别如图 3、图 4 所示。

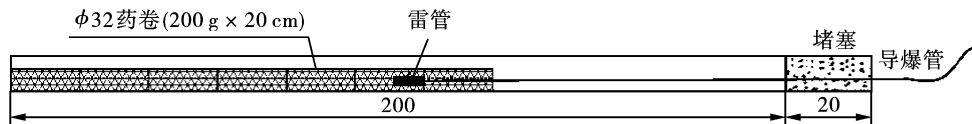


图 3 侧墙装药结构示意图(单位:cm)

Fig. 3 Chart of sidewall charge structure(unit:cm)

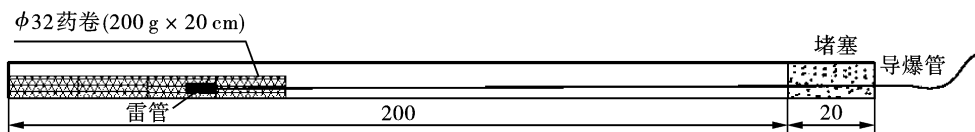


图 4 圆弧段装药结构示意图(单位:cm)

Fig. 4 Chart of charge structure in arc section(unit:cm)

隧洞开挖共布置 15 个轮廓孔,顶部弧线段周边孔间距约为 65 cm,I 类、II 类围岩侧墙和底板周边孔间距约为 70 cm,III 类、IV 类围岩侧墙和底板周边孔间距可适当较小,装药量适当减少,具体详见图 5。

2.3 爆破参数

隧洞钻孔爆破共布置了 41 个炮孔,其中掏槽孔 13 个(含空孔)、崩落孔 13 个、周边孔 15 个,详细的钻孔参数及装药参数见表 1,爆破孔的布置及起爆网路图见图 5。

3 隧洞爆破开挖效果

丰店-彭店水库连通应急引水工程隧洞断面面积小,岩体完整且强度极高,掏槽爆破效果直接影响到隧洞开挖效果,工程联合使用多空孔直孔掏槽爆破及空气间隔装药轮廓爆破技术,实现了引水隧洞的安全高效开挖。隧洞开挖成型效果见图 6,最大超挖约 20 cm,基本上无欠挖,采用空气间隔装药光面爆破技术得到的轮廓面平整度与传统轮廓爆破的相

差不多,而且有操作工艺简便、火工品用量少、施工速度快等特点,成功解决了小直径炸药卷、导爆索等

火工品缺失对丰店—彭店水库连通应急引水工程爆破开挖的制约。

表 1 爆破钻孔参数及装药参数表

Table 1 Blasting drilling parameters and charge parameters table

炮孔类型	钻孔参数			装药参数					
	孔径/mm	孔深/cm	孔数	药径/cm	装药长度/cm	堵塞长度/cm	单孔药量/kg	单响药量/kg	雷管段别
辅助空孔	42	240	8	/	/	/	/	/	/
掏槽孔	42	240	1	32	220	10	2.2	2.2	MS1
	42	220	2	32	200	20	2.0	4.0	MS3
	42	220	2	32	200	20	2.0	4.0	MS5
崩落孔	42	220	2	32	180	20	1.8	3.6	MS7
	42	220	2	32	180	20	1.8	3.6	MS9
	42	220	3	32	160	20	1.6	4.8	MS11
	42	220	6	32	160	20	1.6	9.6	MS13
周边孔	42	200	15	32	80	20	0.8	12.0	MS15
合计			41					43.8	

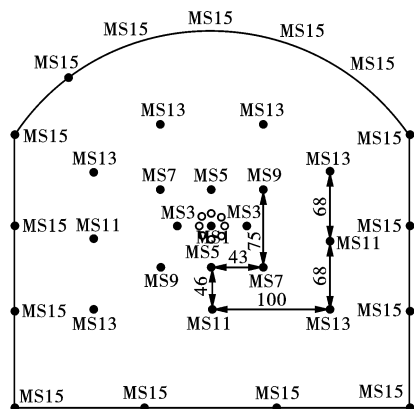


图 5 爆破孔布置示意图(单位:cm)

Fig. 5 Schematic layout of blasting hole(unit:cm)



(a) 施工期 (a) Construction period (b) 竣工期 (b) Completion period

图 6 轮廓成型效果图

Fig. 6 Contour shaping effect diagram

4 结语

针对丰店-彭店水库连通应急引水工程小断面、特坚硬岩隧洞爆破开挖,提出联合使用多空孔直孔掏槽爆破技术、空气间隔装药轮廓爆破技术方案,取得了较好的开挖循环进尺及轮廓面成型效果,高效地完成了该工程的引水隧洞开挖施工。

参考文献 (References)

[1] ZHU Zhe-ming, XIE He-ping, BIBHU Mohanty. Numerical investigation of blasting induced by underground explosion [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2008, 45: 111-121.

[2] 梁 瑞,余瑞利,周文海,等. 基于 LS-DYNA 模拟的准直眼掏槽爆破技术研究 [J]. 有色金属工程, 2019, 9(8): 101-107.

[2] LIANG Rui, YU Rui-li, ZHOU Wen-hai, et al. Research on quasi-parallel cutting blasting technology based on LS-DYNA simulation [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(8): 101-107. (in Chinese)

[3] SHAPRIO V Ya. Efficiency of cut configuration in driving tunnels with a set of deep blast holes [J]. Journal of Mining Science, 1989, 25(4): 379-386.

[4] 杨玉银,陈长贵,黄 浩,等. 分部楔形掏槽在硬质岩石隧洞开挖中的应用 [J]. 工程爆破, 2015, 21(6): 67-72.

[4] YANG Yu-yin, CHEN Chang-gui, HUANG hao, et al. Application of sectional wedge cutting in hard rock tunnel excavation [J]. Engineering Blasting, 2015, 21(6): 67-72. (in Chinese)