

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.009

基于超前地质预报的丁寨防洪排涝隧洞 爆破施工方案研究*

李建林¹, 项海玲¹, 黄正东¹, 吴亮²

(1. 湖北水总水利水电建设股份有限公司, 武汉 430056;

2. 武汉科技大学理学院 湖北省智能爆破技术研究中心, 武汉 430065)

摘要: 复杂岩体条件下的隧洞爆破施工技术研究对于获得良好爆破效果及避免地质灾害的发生具有十分重要的意义。依托丁寨防洪排涝隧洞工程, 针对复杂地质条件下的隧洞爆破开挖, 提出了集掌子面出露岩体分析、超前地质预报、超前支护、爆破施工方案优化等于一体的成套隧洞爆破施工技术。首先进行掌子面出露岩体分析, 并采用地质雷达法探测掌子面前体不良地质体发育范围和程度; 然后基于地质雷达法探测结果, 预测掌子面前不同部位围岩条件。针对岩体可能存在破碎带、溶洞、溶缝等不良地质体的部位, 通过超前钻探确定破碎带的位置和范围或岩溶发育范围和程度, 并提出相应的围岩超前支护与稳定性控制措施; 针对岩体相对完整的部位, 按照常规的施工方案进行爆破开挖。最后综合超前地质预报结果与记录的钻杆钻进速度, 评估不良地质体分布和范围, 判定不同部位待开挖岩体围岩类别, 优化爆破施工方案。现场应用后, 隧洞轮廓成型效果较好, 超欠挖得到了有效的控制。在不良地质段也未出现塌方、突泥涌水现象, 实现了隧洞高效安全开挖。爆破施工技术可为同类工程建设提供参考。

关键词: 隧道工程; 钻爆法; 复杂地质条件; 超前地质预报; 优化方案

中图分类号: U455 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)04-0061-07

Study on Blasting Construction Scheme of Dingzhai Flood Control and Drainage Tunnel based on Advanced Geological Forecast

LI Jian-lin¹, XIANG Hai-ling¹, HUANG Zheng-dong¹, WU Liang²

(1. Hubei Shui Zong Hydraulic and Hydropower Construction Co., Ltd., Wuhan 430056, China;

2. Hubei Provincial Intelligent Blasting Technology Research Center, College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

Abstract: The study of tunnel blasting construction technology under complex rock conditions is of great significance for achieving good blasting effects and avoiding the occurrence of geological disasters. Relying on Dingzhai flood control and drainage tunnel project, aiming at the tunnel blasting excavation under complex geological conditions, a complete set of tunnel blasting construction technology is proposed that integrates the analysis of the exposed rock mass at the tunnel face, advance geological forecast, advance support, and optimization of blasting construction scheme. Firstly, the exposed rock mass of the tunnel face is analyzed, and the development range and degree of adverse geological body in front of the tunnel face are detected by geological radar method; Then, the surrounding rock conditions of different parts in front of the handcart are predicted based on the detection results of the ground penetrating radar method. For the parts of the rock mass where there may be unfavorable geologic bodies such as broken zones, karst caves, and karst fractures, advance drilling is used to determine the location and range of the broken zone or the range and extent of karst zone, and corresponding advanced support and stability control measures for surrounding rocks are proposed; For the parts with relatively complete rock mass, blasting excavation is carried out according to the conventional construction scheme. Finally, the results of advance geological forecast and the recorded

drilling speed are combined to evaluate the distribution and range of the unfavorable geologic bodies, determine the types of surrounding rock masses to be excavated in different locations, and optimize the blasting construction plan. After the field application, the tunnel contour shaping effect is better, and the over-under-excavation has been effectively controlled. There were no landslides, mud outbursts and water gushing in unfavorable geologic sections, and efficient and safe excavation of the tunnel was realized. The blasting construction technology can provide a reference for the construction of similar projects.

Key words: tunnel engineering; drilling and blasting method; complex geological conditions; forecast technique for advance geology; optimization scheme

水利水电、交通、市政等工程建设过程中广泛涉及到隧洞施工。而钻孔爆破因具有经济、高效、快速的优势而被广泛应用于隧洞工程建设中。隧洞爆破开挖过程中,岩体内岩溶、断层、软弱夹层、破碎带等不良地质体的存在不但会显著影响爆破效果,导致严重的超欠挖^[1],还可能诱发地质灾害^[2-4],严重时还会诱发安全事故,对项目的进度、成本、安全控制产生十分不利的影 响^[5]。因此在隧道施工时若可能存在不良地质体,往往需要开展超前地质预报工作,为提前采取防范措施和及时调整爆破施工方案提供依据,确保隧道安全、高效施工。

目前超前地质预报方法已经普遍应用于隧道工程不良地质体探测工作中^[6,7],且已经从单一的方法,如地质调查法、超前钻探法、物理探测法等逐渐向综合探测的方法转变^[8-10]。但大部分都只是预报了不良地质体发育范围和程度,进一步地,也有将超前地质预报方法与隧道掘进机(TBM)施工方法相结合进行隧道开挖的研究^[11,12],但较少有将超前地质预报方法与钻爆法施工方法相结合并应用于隧道开挖中,即根据超前地质预报结果优化爆破施工方案。依托咸丰县新城区丁寨防洪排涝隧洞工程,针对复杂地质条件下的隧洞爆破开挖,提出了集掌子面出露岩体分析、超前地质预报、超前支护、优化爆破施工方案等于一体的成套隧洞爆破施工技术,施工现场应用基于超前地质预报的隧洞爆破施工技术后,隧洞轮廓成型效果较好,超欠挖得到了有效的控制,并有效防范了严重的工程地质灾害。

1 丁寨防洪排涝隧洞工程概况

丁寨防洪排涝隧洞属于咸丰县新城区丁寨防洪

排涝工程项目的关键部分,防洪排涝隧洞工程进口位于丁寨乡天星孔,线路经 S232 省道在 72 km 附近,穿 039 乡道东侧山体,出口位于断明峡丁寨水电站右岸。隧洞全长 4.57 km,断面尺寸为 9 m × 12 m,进口底板设计高程 729 m,出口底板设计高程 548 m,坡比 1:75 至 1:16。岩性为以灰岩、白云质灰岩、灰质白云岩、白云岩为主,局部夹少量页岩、硅质页岩、炭质页岩及煤层。岩溶形态发育较为齐全,主要岩溶形态类型有石峰(丘)、石牙、溶蚀洼地、溶沟、溶槽、漏斗等地表岩溶形态以及溶缝、落水洞、溶洞、天窗、地下管道系统、排泄泉及地下暗河等地下埋藏型岩溶现象。丁寨防洪排涝隧洞线路穿越岩溶发育区,尤其是发育的天星孔地下暗河系统对防洪排涝隧洞影响较大。

丁寨防洪排涝隧洞围岩以Ⅱ、Ⅲ围岩为主,部分为Ⅳ、Ⅴ围岩,但遇到岩溶、地下水、断层、裂隙发育时,其围岩类别则相应降低。隧洞岩体采用钻爆法开挖,该方法难以根据有限的地质勘察资料准确地判断掌子面后岩体内不良地质体发育范围和程度,相应地也无法及时调整施工方案,可能导致爆破能量利用率低,超欠挖严重,甚至因不良地质体的存在,可能导致施工安全事故。因此需要提前做好超前地质预报,通过超前预报,及时发现异常情况,预报掌子面前方不良地质体的位置、产状及其围岩结构的完整性与含水的可能性,为正确选择开挖方案、支护设计参数和优化爆破施工方案提供依据。

2 基于超前地质预报的隧洞爆破施工技术

针对丁寨防洪排涝隧洞工程复杂地质条件下岩体爆破开挖,提出集掌子面出露岩体分析、超前地质预报、超前支护、爆破施工方案优化等于一体的成套隧洞爆破施工技术。基于超前地质预报的隧洞爆破施工流程图如图 1 所示。

首先进行掌子面出露岩体统计分析,并采用地质雷达法探测掌子面前岩体不良地质体发育范围和程度,探地雷达采用的是时间域脉冲方式,系统主机

收稿日期:2021-08-27

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:项海玲(1978-),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) 250970972@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(51979205)

控制发射机通过天线将高频带的脉冲电磁波向隧道掘进面前方向发射^[13]。垂直于隧道掘进面传播的电磁波当遇到有电性差异(介电常数、电导率、磁导率不同)界面或目标体时即发生反射,反射波被天线接收进入接收机,并传回主机,可得到各个反射波往返旅行时间 t 。不同地下介质介电常数的差异决定了反射系数的大小,呈正比关系,即差异越大,反射系数越大,越容易被探测到^[14]。常见介电常数见表1。在相对介电常数 E_r 给定的情况下,已知雷达波在空气中的传播速度,就可以使用式(1)换算成目标体的深度 H 。介质中不同深度的反射波返回主机,然后进行信号放大、采集整理、过滤杂波和数字叠加等分析处理,就能把雷达波反射的时间曲线直观地显示出来。通过连续探测就构成了地质雷达成果剖面图,从而进一步可以推断目标体的位置、规模和影响范围。地质雷达探测工作原理如图2所示。

$$H = \frac{ct}{2\sqrt{E_r}} \quad (1)$$

式中: H 为目标体的深度; t 为反射波往返旅行时间; E_r 为相对介电常数; c 为雷达波在空气中的传播速度。

表1 常见介电常数
Table 1 Common dielectric constants

介质种类	相对介电常数	速度/(m·nm ⁻¹)
空气	1	0.300
水	81	0.033
粘土	8~12	0.060
泥岩	7	0.090
白云岩	6.8~8	0.100~0.110
灰岩	7~8	0.106~0.115
干页岩	4~9	0.100~0.150

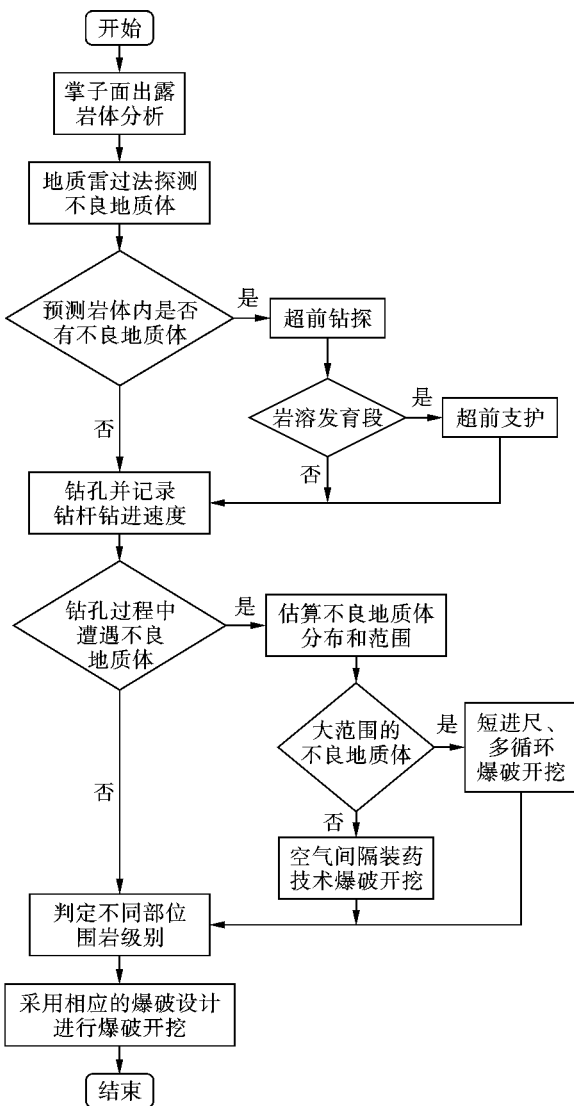


图1 施工流程图

Fig. 1 Construction flow chart

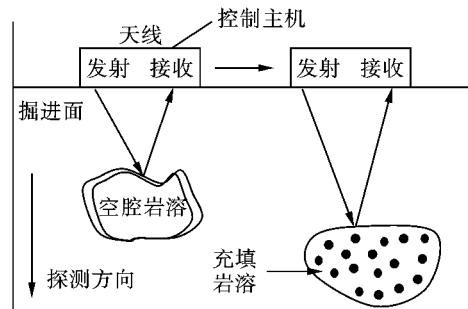


图2 地质雷达超前探测原理示意
Fig. 2 Schematic diagram of advance detection principle of geological radar

然后基于地质雷达法探测结果,预测掌子面前不同部位围岩条件。对于岩体可能存在破碎带、溶洞、溶缝等不良地质体的部位,通过超前钻探确定破碎带的位置和范围或岩溶发育范围和程度,并提出相应的围岩超前支护与稳定性控制措施;对于岩体相对完整的部位,按照常规的施工方案进行爆破开挖。

最后基于上述分析,进行爆破施工。在钻孔过程中,记录钻杆钻进速度,进一步判断岩体内是否有破碎带、溶洞、溶缝等不良地质体,若有则结合超前预报结果,估算不良地质的分布和范围。当钻孔过程中遭遇不良地质体且不良地质体的范围较大时,采用短进尺、多循环的方法进行爆破开挖,避免炮孔穿越大范围的不良地质体进行爆破施工;当钻孔过程中遭遇范围较小的不良地质体时,可适当增大循环进尺长度,炮孔可穿越小范围的不良地质体,但要优化炮孔装药结构,根据记录的钻杆钻进速度判断小范围的不良地质体与炮孔的相对位置,若其位于

炮孔装药段,采用空气间隔装药技术,即在与小范围不良地质体对应的炮孔装药段设置空气间隔,其余部位正常装药。此外,要根据超前地质预报结果、钻孔过程钻杆记录数据,评估不良地质体对岩体强度的影响,判定不同部位待开挖岩体围岩类别,优化爆破设计,其中Ⅱ、Ⅲ级围岩、Ⅳ级围岩、Ⅴ级围岩分别采用不同的爆破施工参数。

3 现场应用分析

3.1 地质雷达超前地质预报

以丁寨防洪排涝隧洞工程 $P1 + 504.5 \sim P1 + 474.5$ 为例,采用电磁波法预报,采集方式为点测,发射频率 64 kHz ,每扫描 采样数为 1024 ,记录长度为 600 ns 。测线布置情况具体如图 3 所示(面对掌子面左、右)。掌子面($P1 + 504.5$)出露的岩体为风化灰岩,岩体较完整,呈块状和层状结构,节理裂隙较发育,局部少有填充物,掌子面表面干燥。掌子面整体性相对较好。掌子面照片如图 4 所示。

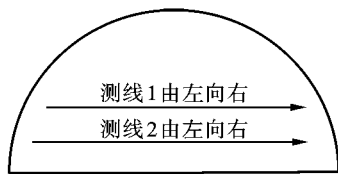
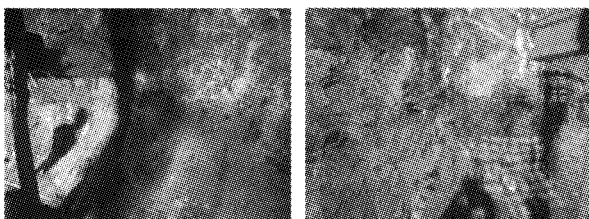


图 3 地质雷达测线布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of geological radar survey line layout



(a) 掌子面左侧 (a) Left side of tunnel face
(b) 掌子面右侧 (b) Right side of tunnel face

图 4 掌子面出露岩体

Fig. 4 Exposed rock mass of tunnel face

地质雷达探测结果如图 5 所示。雷达图像波形特征为:掌子面前方 $0 \sim 7 \text{ m}$ 处信号相对较弱, $7 \sim 14 \text{ m}$ 段右侧存在多条斜向条状强反射信号,且走势基本一致。 $14 \sim 20 \text{ m}$ 段中部及左侧呈现数条为隐约条带状反应,同相轴连续均匀,呈层面反射,信号下方有多次反应但比较杂乱。根据波形特征及掌子面出露岩体综合分析预测:前 $0 \sim 7 \text{ m}$ 地质条件相对较好, $7 \sim 14 \text{ m}$ 段右侧存在断层破碎带的可能性

较大,不排除填充型岩溶的可能, $14 \sim 20 \text{ m}$ 段中部存在断层破碎带的可能性较大,岩溶可能性不大。

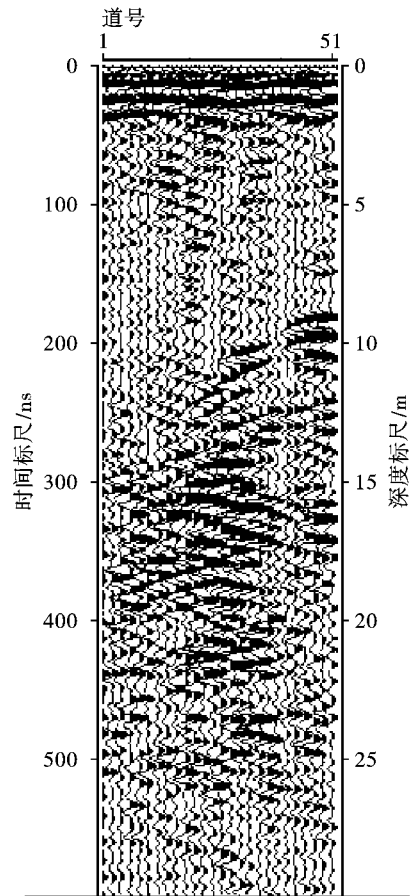


图 5 地质雷达探测结果

Fig. 5 Geological radar detection results

3.2 爆破优化施工方案

基于地质雷达超前预报探测结果,并结合超前钻探结果,可知丁寨防洪排涝隧洞工程 $P1 + 504.5 \sim P1 + 474.5$ 可大致分为三段,即 $0 \sim 7 \text{ m}$ 为一段, $7 \sim 14 \text{ m}$ 为一段, $14 \sim 20 \text{ m}$ 为一段。 $0 \sim 7 \text{ m}$ 段岩体地质条件相对较好,岩体纵波波速较大,岩体内无不良地质体,判定 $0 \sim 7 \text{ m}$ 段岩体级别为Ⅲ级围岩; $7 \sim 14 \text{ m}$ 岩体存在断层破碎带和溶洞,岩体比较破碎,围岩稳定性较差,岩体内含小型溶洞,判定 $7 \sim 14 \text{ m}$ 段岩体级别为Ⅴ级; $14 \sim 20 \text{ m}$ 段岩体存在断层破碎带,不存在溶洞,存在少量的溶缝,围岩相对稳定,判定 $14 \sim 20 \text{ m}$ 段岩体级别为Ⅳ级。针对丁寨防洪排涝隧洞工程 $P1 + 504.5 \sim P1 + 474.5$ 不同段的不同围岩级别,采用不同的爆破方案。掌子面($P1 + 504.5$)前 $0 \sim 7 \text{ m}$ 段Ⅲ级围岩爆破开挖炮孔布置图如图 6 所示。掌子面($P1 + 504.5$)前 $7 \sim 14 \text{ m}$ 段Ⅴ级围岩爆破开挖炮孔布置图如图 7 所示。掌子面($P1 + 504.5$)前 $14 \sim 20 \text{ m}$ 段Ⅳ级围岩爆破开挖炮

孔布置图如图8所示,不同围岩情况下钻爆参数如表2所示。

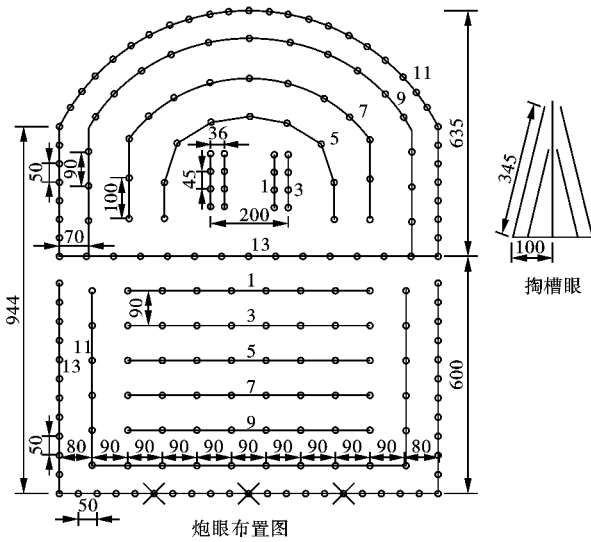


图6 Ⅲ级围岩爆破开挖炮孔布置图(单位:cm)

Fig. 6 Blast hole layout for blasting excavation of class III surrounding rock (unit:cm)

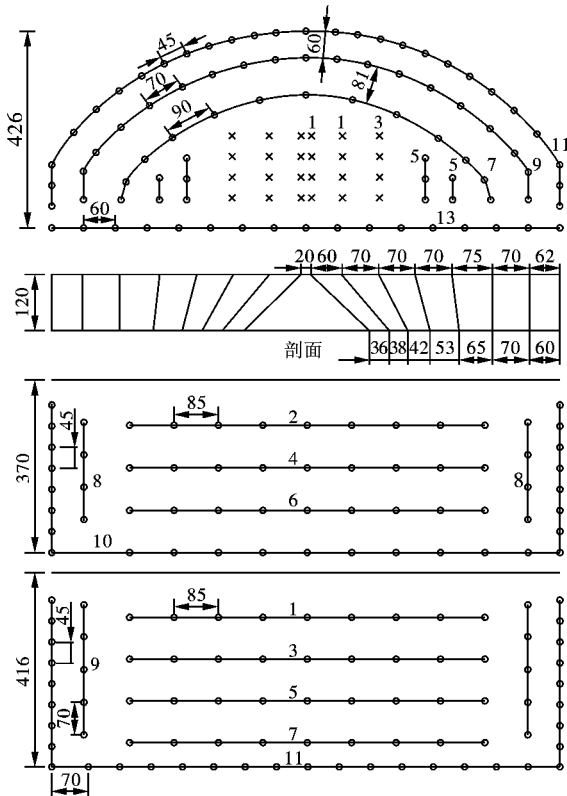


图7 Ⅴ级围岩爆破开挖炮孔布置图(单位:cm)

Fig. 7 Blast hole layout for blasting excavation of class V surrounding rock (unit:cm)

3.3 开挖效果

掌子面(P1 + 504.5)前0 ~ 7 m 段Ⅲ级围岩爆

破开挖成型效果如图9(a)所示,掌子面(P1 + 504.5)前7 ~ 14 m 段Ⅴ级围岩爆破开挖成型效果如图9(b)所示,掌子面(P1 + 504.5)前14 ~ 20 m 段Ⅳ级围岩爆破开挖成型效果如图9(c)所示。由图9可得,采用基于超前地质预报的隧洞爆破施工技术进行施工后,不同部位不同围岩级别条件下,爆后明显可见隧道洞壁半眼残痕,且半眼残痕率较高,隧洞轮廓成型效果较好,超欠挖得到了有效的控制,在不良地质段也未出现塌方、突泥涌水现象,实现了隧洞高效安全开挖。

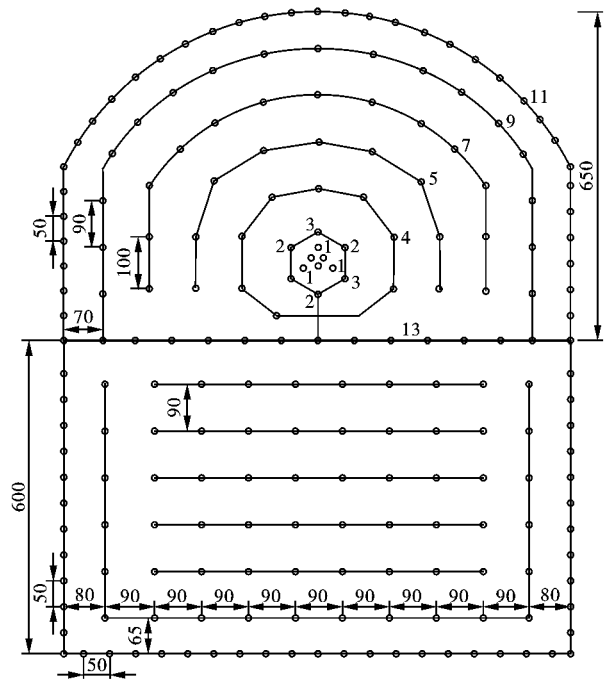


图8 Ⅳ级围岩爆破开挖炮孔布置图(单位:cm)

Fig. 8 Blast hole layout for blasting excavation of class IV surrounding rock (unit:cm)

4 结论

(1)针对复杂地质条件下的隧洞爆破开挖,提出了集掌子面出露岩体分析、超前地质预报、超前支护、爆破施工方案优化等于一体的成套隧洞爆破施工技术。

(2)在丁寨防洪排涝隧洞工程施工过程中,应用基于超前地质预报的隧洞爆破施工技术,爆后明显可见隧道洞壁半眼残痕,且半眼残痕率较高,隧洞轮廓成型效果较好,超欠挖得到了有效的控制,在不良地质段也未出现塌方、突泥涌水现象,实现了隧洞高效安全开挖。

表2 不同围岩情况下爆破开挖钻爆参数

Table 2 Drilling and blasting parameters of blasting excavation under different surrounding rock conditions

围岩类型	部位	炮孔名称	数量	炮孔深度/m	装药系数/%	单孔装药量/kg	雷管段别		
Ⅲ级	上断面	掏槽孔	16	2.3、3.4	80	2.0、2.6	MS-1		
		掘进孔	22	3.2	70	2.2	5、7		
		辅助孔	23	3.2	60	2.0	MS-9		
		周边孔	35	3.2	40	0.9	MS-11		
		底板孔	15	3.2	70	1.8	MS-13		
	下断面	辅助孔	52	3.2	70	2.0	1、3、5、7、9		
		周边孔	20	3.2	40	0.9	MS-11		
		底板孔	21	3.2	70	1.8	MS-13		
		Ⅳ级	上断面	掏槽孔	3	2.4	80	1.4	MS-1
				掏槽孔	6	2.4	80	1.8	2、3
掘进孔	9			2.2	70	1.4	MS-4		
掘进孔	22			2.2	70	1.4	5、7		
辅助孔	17			2.2	60	1.4	MS-9		
下断面	周边孔		35	2.2	40	0.5	MS-11		
	底板孔		15	2.2	70	1.1	MS-13		
	辅助孔		60	2.2	70	1.4	1、3、5、7、9、11		
	周边孔		20	2.2	40	0.5	MS-13		
	底板孔		21	2.2	70	1.1	MS-15		
Ⅴ级	上断面	掏槽孔	8	1.2	80	0.6	MS-1		
		掏槽孔	16	1.2	80	0.5	1、3		
		掘进孔	10	1.2	70	0.5	MS-5		
		掘进孔	13	1.2	70	0.7	MS-7		
		辅助孔	18	1.2	60	0.8	MS-9		
	中断面	周边孔	27	1.2	40	0.3	MS-11		
		底板孔	17	1.2	70	0.4	MS-13		
		辅助孔	32	1.2	70	0.9	1、3、5、7		
		周边孔	14	1.2	40	0.3	MS-9		
		底板孔	13	1.2	70	0.4	MS-11		
下断面	辅助孔	40	1.2	70	0.9	1、3、5、7、9			
	周边孔	16	1.2	40	0.3	MS-11			
	底板孔	17	1.2	70	0.4	MS-13			

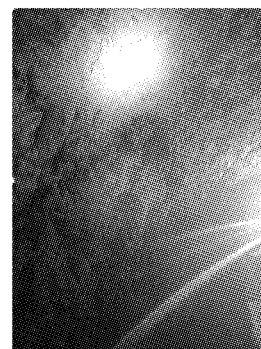
(a) Ⅲ级围岩
(a) Class III rock mass(b) Ⅳ级围岩
(b) Class IV rock mass(c) Ⅴ级围岩
(c) Class V rock mass

图9 不同围岩情况下爆破开挖成型效果

Fig. 9 Effect of blasting excavation and forming under different surrounding rock conditions

参考文献(References)

- [1] 高远,陈清作,林贵松,等.喀斯特地貌综合管廊爆破施工关键技术[J].施工技术,2017,46(13):141-143.
- [1] GAO Yuan, CHEN Qing-zuo, LIN Gui-song, et al. Key blasting construction technology of pipe gallery in karst landform[J]. Construction Technology, 2017, 46(13): 141-143. (in Chinese)
- [2] 张优利,刘胜春,梁顺,等.隧道穿越断层破碎带关键技术研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2013,37(3):529-532.
- [2] ZHANG You-li, LIU Sheng-chun, LIANG Shun, et al. Technology of tunnel through the fault fracture zone[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2013, 37(3): 529-532. (in Chinese)
- [3] 葛颜慧,李术才,张庆松,等.基于风险评价的岩溶隧道综合超前地质预报技术研究[J].岩土工程学报,2010,32(7):1124-1130.
- [3] GE Yan-hui, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Comprehensive geological prediction based on risk evaluation during tunneling in karst area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1124-1130. (in Chinese)
- [4] 钱七虎.地下工程建设安全面临的挑战与对策[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10):1945-1956.
- [4] QIAN Qi-hu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945-1956. (in Chinese)
- [5] DU L Z, ZHANG X P, NIU J J, et al. The seismic CT method in measuring rock bodies[J]. Applied Geophysics, 2006, 3(3): 192-195.
- [6] 王汪汪,牟元存. TSP 隧道超前地质预报技术在宽断层内部的应用[J].工程地球物理学报,2021,18(2):186-193.
- [6] WANG Wang-wang, MU Yuan-cun. Application of TSP to tunnel advanced geological prediction inside the wide fault[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(2): 186-193. (in Chinese)
- [7] 颜英军,李钰强,王海涛. TGS360Pro 和 TRT7000 在某隧道施工超前地质预报中的应用对比[J].工程地球物理学报,2021,18(1):59-66.
- [7] YAN Ying-jun, LI Yu-qiang, WANG Hai-tao. Application comparison of TGS360Pro and TRT7000 in advanced geological prediction of tunnel construction[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2021, 18(1): 59-66. (in Chinese)
- [8] 晏军.岩溶隧道超前地质预报几种主要物探方法的选择与实践[J].隧道建设(中英文),2020,40(S1):327-336.
- [8] YAN Jun. Selection and application of several main geophysical methods for advanced geological prediction of karst tunnels[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(S1): 327-336. (in Chinese)
- [9] 覃晖,唐玉,王峥峥,等.综合探测技术在隧道超前地质预报中的应用[J].现代隧道技术,2018,55(S2):681-686.
- [9] QIN Hui, TANG Yu, WANG Zheng-zheng, et al. Application of comprehensive detection methods in tunnel geological forecast[J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55(S2): 681-686. (in Chinese)
- [10] 李俊杰,张红纲,王伟,等.综合物探技术在灰岩地区隧洞超前预报中的应用[J].地质与勘探,2019,55(6):1452-1462.
- [10] LI Jun-jie, ZHANG Hong-gang, WANG Gang, et al. Application of integrated geophysical methods to advanced prediction of a tunnel in a limestone area[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(6): 1452-1462. (in Chinese)
- [11] 刘俊,韩立军,孟庆彬. TBM 隧道综合超前地质预报及其在阳灵隧道的应用[J].山东大学学报(工学版),2019,49(4):51-60.
- [11] LIU Jun, HAN Li-jun, MENG Qing-bin. TBM comprehensive advanced geological prediction in a tunnel and its application in Yangling Tunnel[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2019, 49(4): 51-60. (in Chinese)
- [12] 卢松,汪旭,李苍松,等.应用 HSP 法的 TBM 隧道施工地质预报技术研究[J].现代隧道技术,2020,57(3):30-35.
- [12] LU Song, WANG Xu, LI Cang-song, et al. Research on geological prediction technology of TBM tunnel construction using HSP method[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(3): 30-35. (in Chinese)
- [13] 李斌.地质雷达在阳山隧道岩溶发育段的应用研究[J].能源与环保,2021,43(6):144-148.
- [13] LI Bin. Research on application of geological radar in Karst development section of Yangshan Tunnel[J]. China Energy and Environmental Protection, 2021, 43(6): 144-148. (in Chinese)
- [14] 袁宗征.地质雷达在岩溶隧道超前地质预报中的应用[J].勘察科学技术,2018(2):58-61.
- [14] YUAN Zong-zheng. Application of geological radar on advanced geological prediction for karst tunnel[J]. Site Investigation Science and Technology, 2018(2): 58-61. (in Chinese)