

DOI: 10.7672/sgjs2025130125

小断面隧道掘进高效钻爆工艺与周边控制技术研究*

蒋宝峰

(中铁建城建交通发展有限公司,江苏 苏州 215151)

[摘要] 小断面隧道施工难以兼顾开挖效率与良好轮廓形成。以隧道平导工程为背景,开展小断面隧道掘进高效钻爆工艺与周边控制技术研究。首先分析了小断面隧道钻爆施工难题,其次为了提高开挖效率,研究了基于凿岩台车的钻爆施工工艺,优化了掏槽孔、辅助孔和周边孔的装药封堵结构,确定了起爆爆破振动安全距离。然后针对超欠挖问题,提出了深浅复合光爆孔技术,光爆深孔用于形成开挖轮廓,光爆浅孔用于消除欠挖。采用 ANSYS/LS-DYNA 模拟软件对深浅复合光爆孔进行分析,验证了深浅复合光爆孔技术的可靠性。最后在实体项目开展了现场试验,开挖断面平整光滑,形成了良好的爆破轮廓,炮眼利用率达到了 93.3%。

[关键词] 隧道;钻爆法;光爆孔;开挖效率;有限元分析;试验

[中图分类号] U459

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)13-0125-06

Efficient Drilling and Blasting Technology and Surrounding Control Technology for Small Section Tunnel Excavation

JIANG Baofeng

(China Railway Construction Urban Transportation Development Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215151, China)

Abstract: It is difficult to balance the excavation efficiency and good contour formation in the construction of a small section tunnel. Based on the background of parallel pilot tunnel project, the research on efficient drilling and blasting technology and surrounding control technology of small section tunnel excavation is carried out. Firstly, the difficult problems of drilling and blasting construction of a small section tunnel were analyzed. Secondly, to improve the excavation efficiency, the drilling and blasting construction technology based on drilling jumbo was studied. The charging plugging structure of cutting hole, auxiliary hole, and surrounding hole was optimized, and the safety distance of blasting vibration was determined. Then, aiming at the problem of overbreak and underbreak, a deep and shallow composite optical blasting hole technology was proposed. The optical blasting deep hole was used to form the excavation contour, and the optical blasting shallow hole was used to eliminate the underbreak. The ANSYS/LS-DYNA simulation software was used to analyze the deep and shallow composite optical blasting hole, and the reliability of the deep and shallow composite optical blasting hole technology was verified. Finally, the field test was carried out in the physical project. The excavation section was flattening and smooth, forming a good blasting profile, and the utilization rate of the blast hole reached 93.3%.

Keywords: tunnels; drilling and blasting method; peripheral hole; excavation efficiency; finite element analysis; tests

0 引言

钻爆法作为目前我国岩质隧道的主要施工方法,在隧道与地下工程的建设和发展过程中起着重

要作用^[1-2]。钻爆技术不仅直接影响隧道的掘进速度,而且还与隧道的工程质量及工程造价有着密切的关系^[3-4]。小断面隧道掘进是地下工程建设的组成部分,如何兼顾提高开挖效率与周边控制是一项重要的研究课题。

目前针对小断面隧道施工优化,研究人员做了

* 中铁二十局科技研发项目(YF2299SD01A)

[作者简介] 蒋宝峰,项目经理,工程师,E-mail: 530913805@qq.com

[收稿日期] 2025-01-20

许多工作。罗钰博等^[5]为解决小断面引水隧洞开挖过程中因围岩等级频繁变更导致爆破超欠挖难以控制的问题,开展爆破损伤量化预测,优化了钻爆参数。高轩等^[6]针对小断面隧道全断面施工如何增加进尺长度、控制围岩超欠挖、减少围岩扰动开展研究,通过优化参数,采用内层长孔加外层短孔同时起爆的方式,改善了小断面隧道开挖质量。张国浩等^[7]基于新意法的经营理念,采用FLAC3D对乌龙山隧道中导洞的全断面开挖过程进行了仿真分析。彭俊聪等^[8]针对分岔大断面隧道施工难题,采用了先行隧道独立成型,后在大断面处实现掉头再施工后行隧道的分岔隧道无中导洞施工方法。

针对光面爆破的超欠挖问题,许多研究提出了解决办法。胡桂斌^[9]研究了夹泥灰岩隧道爆破参数对超欠挖的影响,设计了正交试验方案,得出各爆破参数的最佳取值。余绍山等^[10]利用空孔效应控制周边眼爆破效果,现场试验验证了该方法的可靠性。丁祥^[11]探究了互层岩体对隧道爆破超欠挖的影响,研究结果表明对易超挖位置的周边眼炮孔布置优化,隧道轮廓成形更加平整。

以上研究取得了显著的成果,但是针对小断面隧道,经常面临无法兼顾开挖效率与避免超欠挖的问题。本文以某隧道平导施工为工程背景,研究了基于凿岩台车的高效钻爆工艺,提出了深浅复合光爆孔技术控制轮廓形成,现场试验验证了该技术的可靠性。

1 工程概况

1.1 项目概况

某隧道为单洞双线隧道,其中辅助坑道平导施工符合小断面隧道施工。隧道主要穿越灰岩、白云岩地层,泥岩、砂岩、页岩地层,砂岩、砾岩夹泥岩地层,IV、V级围岩占比达到95%以上。

1.2 施工方法

根据小断面隧道机械化配套设施布置条件和有关标准要求,某高海拔铁路隧道辅助坑道工程采取全断面带仰拱的一次性开挖施工,以IV级围岩为例,支护设计如图1所示。

1) 开挖方法:隧道开挖采用光面爆破,在光面爆破设计中对爆破技术诸要素如钻眼大小、孔深、间距、药量、钻眼分布与起爆顺序等进行研究、严格控制。当开挖条件出现变化时,爆破技术随围岩条件的变化相应改变。软岩开挖作业时,严格遵守“短进尺、弱爆破”的原则和相关作业要求。

2) 初支采用喷射混凝土、钢筋网、锚杆、型钢钢

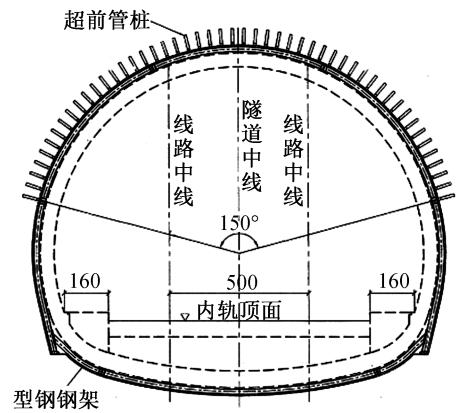


图1 小断面隧道围岩支护设计

Fig. 1 Design of surrounding rock support for small section tunnel

架。初喷3~5cm厚混凝土,出渣完毕后施作锚杆、钢筋网、钢拱架联合支护,复喷混凝土至设计厚度。锚杆采用钻注一体机实施 $\phi 25$ 涨壳式预应力中空注浆锚杆。钢筋网采用 $\phi 6$ 钢筋网格,网格间距20cm \times 20cm。拱架采用型钢钢架,间距1.4m。

3) 二次衬砌采用钢筋混凝土结构,混凝土强度等级C30,拱墙厚40cm,仰拱厚50cm,环向钢筋 $\phi 18 @ 200$,纵向钢筋 $\phi 12 @ 250$ 。

1.3 小断面隧道开挖施工难题

该隧道辅助坑道的围岩级别差异大,平导、斜井等小断面隧道建设遇到了多种级别的围岩。传统钻爆工艺对小断面隧道开挖程度控制难度大,为了追求高效开挖,若提高单循环开挖进尺,一次起爆装药量大,造成超欠挖问题严重;若保证隧道轮廓成型,一次开挖进尺较小,造成无法兼顾高效开挖与周边控制的难题。因此,有必要提出一种改善小断面隧道开挖效果的技术。

2 基于凿岩台车的高效钻爆工艺

2.1 钻孔原则与设备确定

该隧道岩层岩性差异大,钻孔机械设备应具备地质条件适应性强、钻孔效率高、钻孔精度高等特点,具体考虑以下钻孔原则。

1) 设备选型:钻机性能要求移动方便、固定牢固、易操作、效率高、过载能力强、成孔率高等。

2) 钻孔标准:钻孔工作严格按照设计位置及坡度进行施工,满足定位准、角度精、推进稳、炮孔齐四项要求。

3) 施工要求:钻孔开孔时,应尽量避免钻杆与锚杆、锚索相交,同时协调开挖断面设备安装与钻孔平行作业,钻孔过程中,遇软岩应立即停钻,防止孔内坍塌,影响围岩结构平衡。

4) 质量检查: 钻孔施工完毕后, 应组织专人验收, 对不符合要求的钻孔应进行补钻或择点另钻。

根据以上要求, 隧道开挖针对斜井施工和出口施工配备了 21SGBCCR 双臂凿岩台车, 该凿岩台车适用于 $6\text{m}\times 6\text{m}\sim 16\text{m}\times 12.5\text{m}$ 的隧道工程, 满足小断面开挖需求。凿岩台车外观尺寸为 $13\,200\text{mm}\times 2\,250\text{mm}\times 2\,910\text{mm}$, 宽度与高度较小, 可以适应小断面空间要求, 满足坡度 15° 的爬坡要求, 适用于斜井工程施工。两个钻臂可以同时完成钻孔施工, 钻臂可以实现升降角度 $55^\circ\sim -25^\circ$ 和摆动角度 $\pm 45^\circ$, 操作灵活。钻臂的推进梁安装钻杆后可以实现最大孔深 4.5m 的钻孔需求。

2.2 装药施工工艺

凿岩机按炮孔布置图表完成钻孔后, 实施装药施工。掏槽孔、辅助孔、周边孔的装药量设计具有明显差别, 掏槽孔的装药量最大, 辅助孔其次, 周边孔最小, 因此炸药在炮孔内的分布方式不同。为了确保施工效率, 开挖进尺确定为 3m , 设计了装药结构。

2.2.1 掏槽孔施工

掏槽孔是开挖断面的首爆孔, 属于单自由面条件下的爆破, 因此采用连续装药形式, 如图 2 所示。楔形掏槽孔孔深 3m , 孔径 40mm , 装药量为 3kg , 炸药直径 25mm 。装药施工时, 首先向孔内放入 $1\sim 2$ 卷水炮泥, 然后孔内放入 1 根插入雷管的炸药作为炮头, 其次连续装入 7 根药卷, 雷管脚线引出孔外。

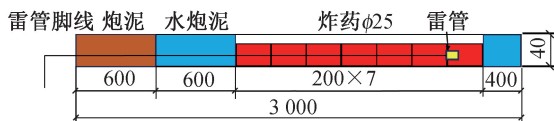


图 2 掏槽孔装药结构

Fig. 2 Charge structure of cut hole

2.2.2 辅助孔施工

辅助孔在掏槽孔之后起爆, 属于双自由面条件下的爆破, 但也需要完成整个断面的破碎, 因此采用连续装药形式, 如图 3 所示。辅助孔孔深 3m , 孔径 40mm , 装药量为 1.5kg , 炸药直径 25mm 。装药施工时, 首先向孔内放入 $1\sim 2$ 卷水炮泥, 然后孔内放入 1 根插入雷管的炸药作为炮头, 其次连续装入 4 根药卷, 雷管脚线引出孔外。可以看出相比掏槽孔装药, 辅助孔减少了 2 卷炸药的放入。

2.2.3 周边孔

周边孔用于形成隧道轮廓, 孔内装药量和孔间距相对较小, 可以采用不耦合装药结构, 减少粉碎区形成。因此采用间隔装药形式, 如图 4 所示。孔

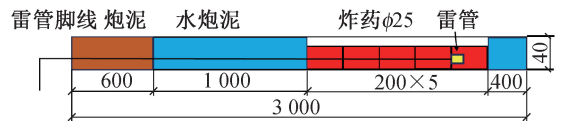


图 3 辅助孔装药结构

Fig. 3 Charge structure of auxiliary hole

深 3m , 孔径 40mm , 装药量为 0.8kg , 炸药直径 25mm 。装药施工时, 首先向孔内放入 $1\sim 2$ 卷水炮泥, 然后选取 4 卷炸药捆绑导爆索装入炮孔中, 孔口处的炸药插入电雷管制作炮头, 雷管脚线引出孔外。

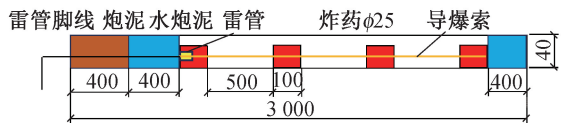


图 4 周边孔装药结构

Fig. 4 Charge structure of peripheral hole

2.3 封堵施工工艺

图 2~4 给出了封堵段的布置方法, 封堵采用了炮泥与水炮泥联合封堵方式, 可以发挥水压爆破优势。封堵施工时, 孔内紧挨炸药装填水炮泥, 孔外由炮泥封堵。采用炮泥与水炮泥联合封堵具有以下优点。

1) 炮孔装药不耦合介质的改变会引起炮孔中能量分布及传播规律的改变。以水作为不耦合介质时, 受爆轰波和高温高压爆生气体产物的冲击压缩作用, 炸药爆炸在水介质中激起爆炸冲击波, 由于水的物理力学性质与空气不一样, 爆炸对岩石的作用机理也不同。

2) 水的可压缩性远小于空气, 且密度高, 具有较大的流动黏度, 爆破时水中爆炸冲击波对孔壁的作用强度和作用时间得到增强, 爆轰产物的膨胀速度变慢, 形成了高压、持续时间长的“水楔效应”, 使得岩体中爆破裂缝扩展密度、范围增加。

3) 水的波阻抗值约是空气的 $3\,500$ 倍, 能量传递效率高, 使得爆破能量均匀平缓作用于孔壁周围岩石, 减轻对围岩损伤及爆破振动; 炮孔内水介质经爆炸作用后会大量挥发为水蒸气, 黏结空气中粉尘颗粒, 降低粉尘量。

2.4 起爆施工工艺

根据 GB 6722—2014《爆破安全规程》, 采用经典萨道夫斯基公式计算质点振动速度:

$$v = k \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: v 为质点振动速度 (m/s); Q 为最大一次起爆药量 (kg); R 为爆心距 (m); k, α 为与场地、装药等

情况有关的拟合参数。

在进行地下爆破时,交通的振动安全允许标准为 15~20cm/s,取 20cm/s。由此确定了起爆药量与爆破振动安全距离的对应关系,如表 1 所示。

表 1 起爆药量与安全距离对应关系

Table 1 Relationship between explosive weight and safety distance

药量/kg	振动速度/(m·s ⁻¹)	安全距离/m
50	20.208	14
100	21.350	17
150	20.488	20
200	20.500	22
250	20.110	24
300	25.690	26

由表 1 中起爆药量和安全距离的关系可以看出,降低一次爆破最大用药量是控制爆破振动最有效的方法之一。

3 小断面隧道光面爆破控制技术

3.1 深浅复合光爆孔技术

小断面隧道高效开挖的矛盾在于开挖进尺和周边控制,为了消除大进尺下的超欠挖现象,提出了一种深浅复合光爆孔方法,如图 5 所示,该方法将光爆深孔和光爆浅孔组合,达到形成轮廓与消除欠挖的目的。

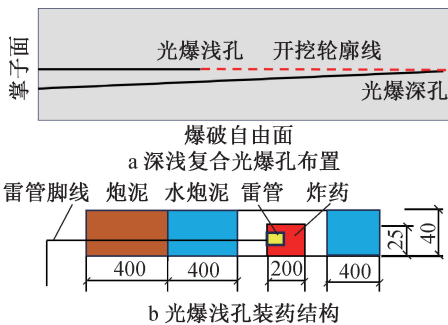


图 5 深浅复合光爆孔技术

Fig. 5 Deep and shallow composite peripheral hole technology

1) 光爆深孔:小断面隧道施工空间狭窄,受初支厚度和凿岩台车的影响,难以沿开挖轮廓精准施工,导致钻孔位置与开挖轮廓有一定距离。因此实施光爆深孔,钻孔时应保持光爆孔的深度方向相对隧道轮廓线倾斜。装药结构采用图 4 中的不耦合间隔装药方法。

2) 光爆浅孔:光爆浅孔可以采用手持钻机人工沿轮廓线钻孔。采用不耦合间隔装药结构,孔底装填水炮泥,孔内装 1 卷炸药后进行水炮孔和炮泥联合封堵。周边浅孔位于周边深孔中间,根据围岩岩

性特征,每隔 1~3 个光爆孔装药。

在上述设计中,将光爆深孔的爆破空间划分了 2 个区域,由导爆索提供短暂延时起爆,降低了同时起爆的爆破振动,光爆深孔中间隔装药的空气柱降低了爆炸冲击波破碎钻孔周围岩体的程度,爆炸气体的气楔作用促进了孔间裂隙的贯通。光爆浅孔用于破碎光爆深孔无法完成的爆破盲区,弥补了光爆深孔因台车作业臂限制,钻眼位置与轮廓线存在一定距离的问题。

3.2 深浅复合光爆孔模拟分析

3.2.1 数值模型

采用 ANSYS/LS-DYNA 模拟软件对深浅复合光爆孔进行分析验证,建模取自隧道爆破中 1 组周边孔进行局部模型分析,分别建立了光面爆破和深浅复合光爆孔的三维数值模型(见图 6),模型尺寸为 1 500mm×2 000mm×5 000mm,单元尺寸为 40mm。

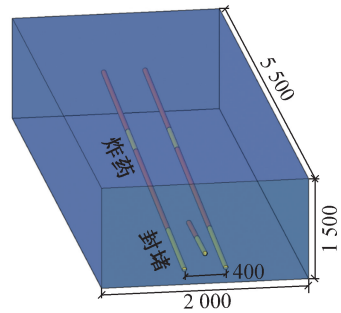


图 6 数值模型建立

Fig. 6 Numerical model

在装药结构设计中,由于主要考虑光爆深孔和光爆浅孔的爆破效果,因此简化了水炮泥封堵,简化了多个间隔装药结构。常规光面爆破模型包含了 2 个周边孔,炮孔间距 400mm,周边孔向上倾角为 5°,孔深 5m,孔口封堵 1m,孔深 3m 处封堵 0.5m,其他部分为炸药。在深浅复合光爆孔模型中,2 个光爆孔中心补充建立 1 个光爆浅孔,平行于掌子面,孔深为 1m,孔口封堵 0.5m,装药 0.5m。

3.2.2 材料参数

在数值模型的算法和材料类型上,采用了流固耦合方法,岩石作为固体采用 RHT 模型,封堵物作为固体采用土壤和泡沫的材料模型,炸药作为流体采用 JWL 材料模型。岩石参考 V 级围岩强度参数,如表 2 所示。炸药参数采用 2 号岩石乳化炸药参数,如表 3 所示。封堵材料与空气材料参考普通土壤常见材料参数,如表 4 所示。

表 2 岩石力学参数

Table 2 Rock mechanics parameters

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	抗压强度/ MPa	波速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	弹性模量/ GPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	黏聚力/ MPa
2 600	30	2 500	10.59	39	8.97

表 3 炸药参数

Table 3 Explosive parameters

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	爆速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	A	B	R_1	R_2	ω	初始内能/ GPa
1 150	3 000	142.0	0.44	3.6	1.6	0.41	3.15

注:A,B,R₁,R₂, ω 均为材料常数

表 4 封堵物参数

Table 4 Stemming material parameters

重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	剪切 模量/ MPa	体积 模量/ MPa	屈服 常数 A_0	屈服 常数 A_1	屈服 常数 A_2	拉坏 压力/ MPa
17	2.5	4 673	0.001	0.005	0.008	-0.005

3.2.3 模拟结果

由于建立的三维模型中,炮孔隐藏在模型内部,直接展示三维效果无法观察完整的损伤效果,因此选择了侧面剖切和俯视图剖切 2 个剖切面。常规光面爆破的侧面图和俯视图如图 7 所示。可以看出,光爆孔起爆后炮孔周围形成明显损伤,随着时间的增加,损伤范围不断扩大,在不耦合装药的间隔段,损伤范围形成了贯通,然而,左侧孔口封堵段岩石仍然保持完整,不利于良好的贯通形成。

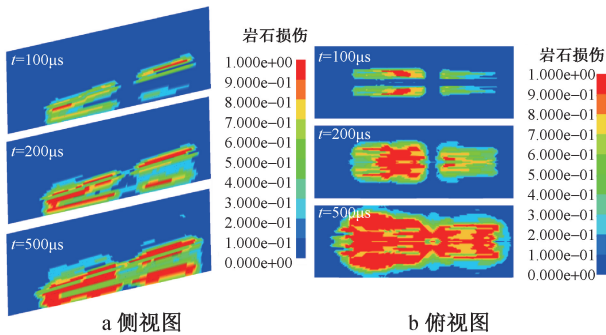


图 7 常规光面爆破效果

Fig. 7 Effect of conventional smooth blasting

深浅复合光爆孔的模拟结果如图 8 所示。可以看出,在炸药起爆时刻,爆破过程与常规光面爆破相似,光爆深孔完成了炮孔周围的岩石损伤,在时间 $t=200\mu\text{s}$ 时,光爆浅孔开始起爆,引起了封堵段岩石的损伤,由于光爆浅孔的装药量较小,没有进一步扩大损伤范围,使得爆破范围基本处于开挖轮廓线以内。

总的来说,深浅复合光爆孔技术消除了爆破盲区,避免了开挖轮廓的欠挖问题,没有进一步造成

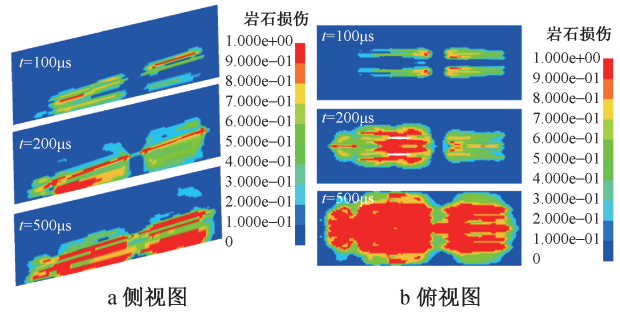


图 8 深浅复合光爆孔爆破模拟结果

Fig. 8 Simulation results of deep and shallow peripheral hole blasting

围岩损伤,确保了良好轮廓线的形成。

4 现场试验

该隧道平导工程实施了基于凿岩台车的高效钻爆工艺以及深浅复合光爆孔技术。全断面爆破试验开挖断面 6.5m(宽)×6.5m(高),断面面积为 46.76m²,炮眼布置如图 9 所示。掏槽孔选择 2 列共 8 个炮孔的楔形布置,开挖进尺为 3m。炮孔密度 2.05 个/m³,炸药单耗 1.03kg/m³。光爆深孔间距 400mm,每 3 个光爆深孔布置 1 个光爆浅孔。钻孔施工采用了 21SGBCCR 双臂凿岩台车,光爆孔采用不耦合装药结构。

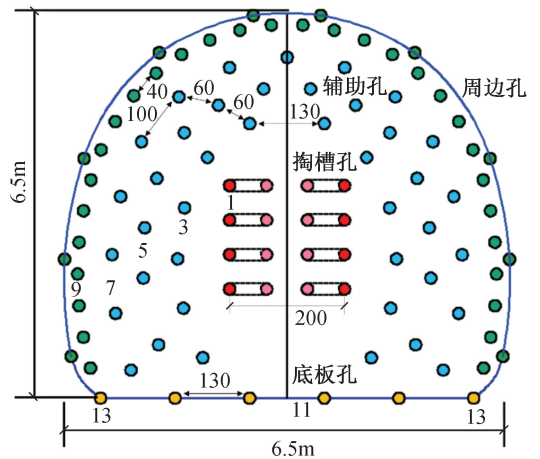


图 9 炮孔布置

Fig. 9 Hole layout

爆破后的开挖断面效果如图 10 所示。在清理完爆破断面的崩落岩石后,观察到开挖断面平整光滑,形成了良好的爆破轮廓。量测平均开挖进尺达到了 2.8m,接近预设开挖进尺 3m,炮眼利用率达到了 93.3%。

5 结语

以某隧道平导工程为背景,开展了小断面隧道掘进高效钻爆工艺与周边控制技术,结论如下。



图10 爆破效果

Fig.10 Blasting effect

1)形成了基于凿岩台车的钻爆施工工艺,优化了掏槽孔、辅助孔和周边孔的装药封堵结构,确定了起爆爆破振动安全距离,确保高效开挖。

2)提出了深浅复合光爆孔技术控制隧道周边,光爆深孔用于形成开挖轮廓,光爆浅孔用于消除欠挖,模拟确定了深浅复合光爆孔技术的可靠性。

3)在该隧道平导段开展了现场试验,清理完爆破断面的崩落岩石后,开挖断面平整光滑,形成了良好的爆破轮廓。量测平均开挖进尺达到了2.8m,接近预设开挖进尺3m,炮眼利用率达到了93.3%。

参考文献:

- [1] 梅敏,张军灵,文佳,等.特长公路隧道全断面钻爆大型机械化施工技术[J].施工技术(中英文),2024,53(18):49-54.
MEI M, ZHANG J L, WEN J, et al. Large-scale mechanized construction technology of extra-long highway tunnel with full-section drilling and blasting[J]. Construction technology, 2024, 53(18):49-54.
- [2] 段伟,韩通,龙葳.钻爆法隧道下穿既有双连拱隧道施工技术研究[J].施工技术(中英文),2024,53(1):93-99.
DUAN W, HAN T, LONG W. Study on construction technology of drilling and blasting tunnel passing through existing twin-arch tunnel[J]. Construction technology, 2024, 53(1):93-99.
- [3] 肖明清,徐晨,谢壁婷,等.高速铁路钻爆法隧道分序支护设计技术研究[J].隧道建设(中英文),2023,43(3):369-382.
XIAO M Q, XU C, XIE B T, et al. Research on design technology of sequential supporting for high-speed railway tunnel constructed by drilling and blasting method[J]. Tunnel construction, 2023, 43(3):369-382.
- [4] 张庆龙,王昌,冯海潮,等.单线隧道Ⅲ级围岩全断面不同爆破开挖工法对比[J].工程爆破,2024,30(4):67-72.
ZHANG Q L, WANG C, FENG H C, et al. Comparison of full-face different blasting excavation method in grade III surrounding rock section of single-track tunnel[J]. Engineering blasting, 2024, 30(4):67-72.
- [5] 罗钰博,阳军生,詹双桥,等.基于GSI分级的小断面引水隧洞超欠挖预测与钻爆参数优化研究[J].岩石力学与工程学报,2024,43(12):3032-3043.
LUO Y B, YANG J S, ZHAN S Q, et al. Prediction of over-under excavation and optimization of blasting parameters in small section diversion tunnels based on GSI classification[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2024, 43(12):3032-3043.

- [6] 高轩,王帅帅,王星,等.小断面铁路隧道凿岩台车钻孔施工光面爆破技术研究[J].现代隧道技术,2022,59(S1):811-817.
GAO X, WANG S S, WANG X, et al. Study on smooth blasting technology in drilling construction of small cross-section railway tunnel with drill trolley[J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(S1):811-817.
- [7] 张国浩,褚存,郭佳嘉.基于新意法理念的连拱隧道设计施工优化[J].科学技术与工程,2021,21(32):13914-13918.
ZHANG G H, CHU C, GUO J J. Design and construction optimization of multi-arch tunnel based on ADECO-RS method[J]. Science technology and engineering, 2021, 21(32):13914-13918.
- [8] 彭俊聪,杨四海,李晓冉,等.深圳市谷对岭分岔隧道无中导洞施工与监测技术[J].施工技术(中英文),2021,50(18):31-35.
PENG J C, YANG S H, LI X R, et al. Construction and monitoring method of guding bifurcated tunnel without middle pilot heading in Shenzhen[J]. Construction technology, 2021, 50(18):31-35.
- [9] 胡桂斌.夹泥灰岩隧道爆破参数对超欠挖的影响研究[J].工程爆破,2024,30(2):78-87.
HU G B. Study on the influence of blasting parameters on overbreak and underbreak in tunnels with marl[J]. Engineering blasting, 2024, 30(2):78-87.
- [10] 余绍山,王薇,李姚伟奇.周边眼偏心空孔爆破设计优化研究与应用[J].铁道科学与工程学报,2024,21(4):1509-1520.
YU S S, WANG W, LI Y W Q. Research and application of offset hole for peripheral blasting design and optimization[J]. Journal of railway science and engineering, 2024, 21(4):1509-1520.
- [11] 丁祥.互层岩体隧道爆破超欠挖控制技术研究[J].铁道工程学报,2022,39(3):75-80.
DING X. Research on the control technology of over-under-excavation of tunnel blasting in interbedded rock masses[J]. Journal of railway engineering society, 2022, 39(3):75-80.

(上接第98页)

- [13] 邓剑峰.地铁隧道施工期管片上浮原因及抗浮措施研究[J].现代城市轨道交通,2011(5):47-49.
DENG J F. Study on the reasons and anti-floating measures of segment floating during subway tunnel construction[J]. Modern urban transit, 2011(5):47-49.
- [14] 王选祥.盾构隧道管片上浮机理及控制技术[J].铁道建筑,2009,49(5):52-55.
WANG X X. Mechanism and control technology of segment floating in shield tunnel[J]. Railway engineering, 2009, 49(5):52-55.
- [15] 张海涛.盾构同步注浆材料试验及隧道上浮控制技术[D].上海:同济大学,2007.
ZHANG H T. Study on the proportioning of tail void grouting material and up floating control of shield tunnel[D]. Shanghai: Tongji University, 2007.