

特长公路隧道全断面钻爆大型机械化施工技术*

梅 敏¹, 张军灵¹, 文 佳¹, 王 军², 闫 静², 金恒翔²

(1. 中交路桥建设有限公司, 北京 101100; 2. 北京交通大学隧道及地下工程教育部工程研究中心, 北京 100044)

[摘要] 特长大断面公路隧道施工是整个高速公路线路施工工期的关键, 为了保证施工质量、提高施工进度, 依托首都环线高速公路 G95 承平段(河北承德—北京平谷)杨家窝铺特长大断面公路隧道工程, 提出了“地质条件适应、环境污染低、性能匹配、功能可靠、技术先进、成本可控、通用性强”的大型机械化设备配套原则, 分析了钻眼爆破、初期支护、仰拱施工及二次衬砌施工过程中所用机械设备的性能与效能, 采用钻爆大型机械化施工技术后, 杨家窝铺隧道的施工进度较计划进度提前 1 个月。

[关键词] 公路工程; 隧道工程; 特长; 全断面; 钻爆法; 机械化施工

[中图分类号] U455.41

[文献标识码]

A

[文章编号]

Large-scale Mechanized Construction Technology of Full-section Drilling and Blasting of Extra-long Highway Tunnel

MEI Min¹, ZHANG Junling¹, WEN Jia¹, WANG Jun², YAN Jing², JIN Hengxiang²

(1. CCCC Road and Bridge Construction Co., Ltd., Beijing 101100, China; 2. Tunnel and Underground Engineering Research Center of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044. China)

Abstract: The construction of an extra-long and large cross-section highway tunnel is the key for entire construction period in expressway. To ensure construction quality and improve construction progress, the principles for supporting large-scale mechanized equipment, such as matching with geological conditions, low environmental pollution, performance matching, reliable function, advanced technology, controllable cost, and strong universality, were proposed based on Yangjiawopu Extra-long and Large Cross-section Highway Tunnel project of G95 Chengping section of Capital Ring Expressway (Hebei Chengde-Beijing Pinggu). The performance and efficiency of mechanical equipment used in drilling and blasting, initial support, inverted arch construction, and secondary lining construction were analyzed. The construction progress of Yangjiawopu Tunnel is one month ahead of schedule after adopting the drilling and blasting large-scale mechanized construction technology.

Keywords: roads; tunnels; extra-long; full-section; drilling and blasting; mechanized construction

0 引言

*中交冀建设开发(河北)有限公司科技项目: 超长大断面公路隧道机械化技术研究; 河北省自然科学基金面上项目(E2021508031), 地震作用下土质隧道压力拱的演化机理及荷载效应

[作者简介] 梅 敏, 高级工程师, E-mail: mmwindy963@163.com

随着我国“交通强国”战略^[1]推进与“国家综合立体交通网”规划^[2]实施, 交通路网覆盖范围越来越广, 规模越来越大。截至 2022 年底, 我国铁路营业总里程达 155

[通信作者] 王 军, 博士研究生, E-mail: 19121114@bjtu.edu.cn

[收稿日期] 2023-08-25

000.0km, 其中铁路隧道 21 978.0km^[3]; 公路总里程 5 354 800.0km, 其中公路隧道 26 784.3km。隧道工程作为所在交通线路的节点工程, 其建设速度往往决定了交通线路的整个工期, 尤其是特长大断面隧道。因此, 保障隧道工程施工安全与质量的前提下, 研究隧道工程的快速施工技术具有重要工程意义。

为此, 诸多学者对隧道工程的快速施工技术开展相关研究, 并取得丰硕成果。例如, 张旭东^[4]结合某铁路隧道沿线 9 条作业线, 提出了低海拔高配型、低海拔低配型及高海拔高配型 3 种类型的机械化配置模型, 并详述了超前支护作业线、开挖作业线、装运作业线、初期支护作业线、仰拱施工作业线、防水层施工作业线及二次衬砌施工作业线等设备配置与适宜性。陶伟明等^[5]总结了国内外铁路隧道机械化配套施工的典型案例分析及国内机械化施工应用效果, 并提出了某铁路隧道机械化施工配套的建议方案。刘飞香等^[6]针对某铁路沿线高原环境、复杂地质、生态环境及施工管理 4 个方面, 提出该铁路隧道施工装配的适应性技术要求, 详述了超前作业、钻爆开挖、初期支护、二次衬砌等工序的高原智能成套装备体系方案。依托郑万高速铁路苏家岩隧道工程, 刘建国^[7]提出一套软弱围岩全断面机械化配套与优化方案, 对比分析了机械与人工开挖 2 种方式下效益与成本, 得出机械化开挖具有显著优势的结论。张勇^[8]介绍了机械化施工过程中超前支护、掌子面处理、洞身开挖及初期支护工序下的机械化设备, 对比分析了机械化与两台阶钻爆两种方式下的工艺与成本, 得出机械化施工优于两台阶钻爆法, 但施工成本较高的结论。吴金刚等^[9]依托兴延高速公路石峡隧道, 提出了自进式管棚集钻进、注浆及支护于一体的快速施工技术, 并成功应用于富水断层破碎带大断面隧道工程。陈国栋等^[10]从隧道掌子面安全控制与洞身变形控制 2 个方面, 总结分析了机械化全断面施工方法、掌子面稳定性评价方法、掌子面超前主动支护技术、掌子面超前支护“量化”精确设计技术、预应力锚杆主动支护技术、早高强喷混凝土主动支护技术、初期支护快

速成环封闭技术及围岩变形压力计算方法等关键技术。王君楼^[11]依托渝昆高速铁路来福隧道工程, 提出适用于台阶法施工的加长臂凿岩台车与增加托举装置的三臂拱架安装台车相结合的方法, 实现了软岩大断面隧道两台阶、三台阶及全断面施工的工序要求, 保障了复杂地质环境下隧道安全快速施工。魏夏鹏等^[12]依托木寨岭公路隧道工程, 研发了预应力锚索一体化施工设备与机械化配套工艺, 详述了预应力锚索一体化施工设备、软岩及破损岩体中的钻孔方法、软岩隧道钻孔排渣方法、预应力锚索安装机构、预应力张拉设备及注浆关键技术。然而, 针对特长大断面公路隧道钻爆机械化快速施工技术研究还不够深入细致。

为此, 本文依托首都环线高速公路 G95 承平段(河北承德—北京平谷)杨家窝铺公路隧道工程, 对特长大断面钻爆机械化快速施工技术开展相关研究, 以期为后续同类工程施工积累经验。

1 工程概况

杨家窝铺隧道是首都环线高速公路(见图 1) G95 承平段(河北承德—北京平谷)的重点工程, 设计标准为上、下行独立双洞 6 车道。其中, 左洞里程 ZK52+200—ZK57+303(长 5 103.0m), 右洞里程 K52+226—K57+280(长 5 054.0m), 左、右洞开挖面积 120.0m², 属于典型的分离式特长大面积隧道。

该隧道进口位于青松岭镇西三岔口村, 出口位于陡子峪乡水厂村。隧道地处构造剥蚀山脉, 最高标高 781.000m, 最低标高 625.000m, 相对高差 126.0m, 山体自然坡度变化较大, 地表水不发育, 地下水以基岩裂隙水(大气降雨补给为主)为主。隧址区地质构造属于燕山隆起带, 南邻燕山地震带小震密集区, 东接辽西地震危险区, 在右洞里程 K53+660—800 段与长 5.1 km 的非全新活动断裂 F11 逆断层相交。隧址区围岩以碎石土、白云岩、砂岩、砂质页岩、安山岩及白云岩为主, 围岩级别为 III, IV, V 级, 其中左洞占比为 44.32%, 44.32%, 11.36%, 右洞占比为 45.07%, 46.25%, 8.68%。



图 1 首都环线高速公路

Fig.1 Capital ring expressway

2 大型机械化设备配套原则

在保证工程施工安全、质量、工期及成本满足要求的前提下，按“地质条件适应、环境污染低、性能匹配、功能可靠、技术先进、成本可控、通用性强”的原则对大型机械化设备进行选型配套，进而形成钻眼爆破、初期支护、二次衬砌及辅助施工的一套机械化作业线。其中，地质条件适应指大型机械化设备要能适应隧道沿线复杂多变的工程水文地质条件；环境污染低指大型机械化设备运行过程中要不产生或少产生对身体有害的尾气，进而最大限度保护操作、技术及管理人员的身体健康；性能匹配指各作

业线上大型机械化设备间的性能要相互协调，且设备性能富余量有限，进而不引起设备性能的浪费；功能可靠指大型机械化设备在作业过程中的功能要稳定可靠，能长时间作业而不频繁发生功能故障，避免影响施工进度；技术先进指大型机械化设备的技术程度要基本达到国内外领先水平，严禁采用淘汰或落后的技术设备，避免在施工过程中埋下安全隐患；成本可控指大型机械化设备的购置、运行、维护及处置成本要控制在工程预算内；通用性强指大型机械化设备要能适应各类复杂地质条件下的隧道工程，保证当前工程完工后能尽快投入未来类似工程，从而充分发挥设备效能。

3 大型机械化配套设备

基于大型机械化设备配套原则，杨家窝铺隧道施工过程中主要采用了全计算机 ZYS113 三臂凿岩台车与半智能 XE3C 凿岩台车进行钻孔，WXHLC1215E 型拱架安装台车进行拱架安装，GHP3015E 型工程混凝土湿喷车进行混凝土喷射，GM6595 型锚杆台车进行锚杆钻孔与安装，YQS6-24m 型全液压自行式栈桥进行仰拱施工，防水板挂布与钢筋绑扎台车进行防水板挂设、土工布铺设及钢筋绑扎，液压自行式二衬台车进行二衬浇筑拆模，改装后的二衬养护台车对脱模后的二衬进行及时养护。施工配套设备如表 1 所示。

表 1 大型机械化快速施工配套设备

Table 1 Large-scale mechanized rapid construction supporting equipment

序号	配套设备	设备示意图
1	凿岩台车	

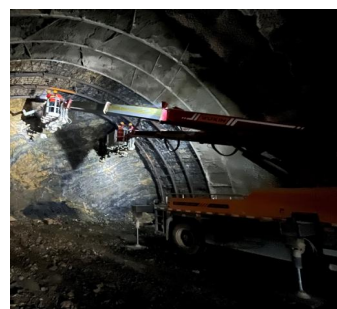
2 运渣车



3 挖掘机



4 拱架安装台车



5 混凝土湿喷台车



6 锚杆台车



7 自行式液压仰拱栈桥



8 防水板挂布与钢筋绑扎台车



9 液压自行式二衬台车



10 改装后的二衬养护台车



4 大型机械化全断面施工技术

为了解决隧道工程施工过程中施工效率低、劳动强度大及安全性低等一系列问

题，充分发挥各类大型机械设备的功能优势，提出适用于全断面钻爆的大型机械化快速施工技术，施工流程如图 2 所示。

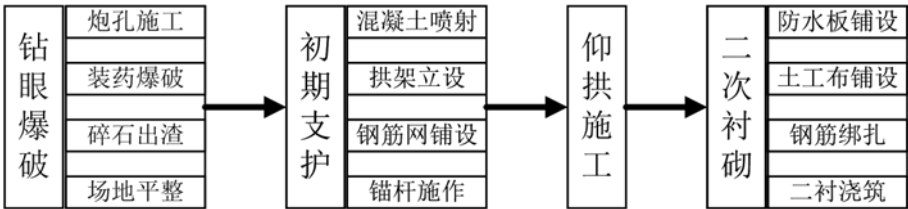


图 2 大型机械化快速施工流程

Fig.2 Large-scale mechanized rapid construction process

4.1 钻眼爆破

4.1.1 工序配套设备与性能参数

钻眼爆破施工过程中需配套全计算机 ZYS113 型三臂凿岩台车、运渣车及挖掘机。其中，全计算机 ZYS113 型三臂凿岩台车的工作范围为 16.6m（宽）×11.3m（高），最大爬坡能力为 25%，最大钻孔深度为 5.25m，钻孔直径为 41.0~140.0mm，整机重 52.0t。半智能 XE3C 型凿岩台车的钻孔直径为 38.0~90.0mm，整机重 49.0t。运渣车的额定载重为 1.6t，车速为 100.0km/h。挖掘机的铲斗容量为 1.0m³，最大挖掘深度与宽度分别为 9.93，6.8m。

杨家窝铺隧道全断面钻眼爆破施工过程中，创造性地采用了双机并打模型，如图 3 所示，即掌子面左侧钻孔采用半智能 XE3C 型凿岩台车施工，右侧钻孔采用全计算机 ZYS113 型三臂凿岩台车施工。



图 3 隧道掌子面双机并打模式
Fig.3 Dual machine parallel drilling mode for tunnel palm face

4.1.2 配套设备效能分析

双机并打模式下的钻眼速度快、施工效率高，如直径 45.0mm、深 4.5m 的炮眼，单个仅需 2.0min；作业面工人数量少，安全性高，如传统人工打孔需 14 人，双机并打模式仅需 8 人；计算机自动控制的炮眼定位准确（见图 4），爆破后岩壁平顺、成型规则，围岩超欠挖控制良好，如图 5 所示。



图 4 炮眼布置图
Fig.4 Gunhole layout plan



图 5 双机并打模式下隧道轮廓
Fig.5 Tunnel contour under dual machine parallel drilling mode

4.2 初期支护

4.2.1 工序配套设备与性能参数

初期支护施工过程中需配套 GHP3015E 型工程混凝土湿喷车、GM6595 型锚杆台车及 WXHLC1215E 型拱架安装台车。其中，GHP3015E 型工程混凝土湿喷车最大喷射高度为 15.8m，宽度为 13.5m，行驶速度为 20.0km/h，料斗容积为 0.3m³，喷头的回转角度为 180°，连续摆动角度为 8°，整机重 15.0t，可通过无线“遥控器”控制喷头进行混凝土喷射作业。GM6595 型锚杆台车的钻孔作业断面为 3.0m×3.0m~8.2m×6.6m，钻孔直径为 38.0~64.0mm，钻孔深度为 4.61m，钻孔速度为 0.8~2.0m/min，整机重 12.0t，最大行走速度为 15km/h，爬坡能力为 14°。WXHLC1215E 型拱架安装台车的最大举升高度为 12.0m，举升能力为 1 000.0kg，水平作业宽度为 9.0m，整车重 18.0t。

4.2.2 配套设备效能分析

GHP3015E 型工程混凝土湿喷车可保证操作人员通过无线“遥控器”控制喷头进行混凝土喷射作业，可操作性强、劳动强度低、安全性高；操作人员还可根据隧道超欠挖引起的围岩表面凹凸情况进行喷头方向的精确调整及定位，从而降低混凝土回弹率，现场实测平均回弹率仅为 9.9%；该型工程混凝土湿喷车自行配备的液态添加剂计量输送装置不仅可对混凝土与速凝剂流量实现同步程序控制，还可根据现场喷射情况实时

调整速凝剂掺量与混凝土喷射量，有效提高混凝土喷射质量；相比于传统人工喷射量 3.0~4.0m³/h，该型工程混凝土湿喷车的平均喷射量高达 15.0m³/h，工作效率显著提高。

GM6595 型锚杆台车的转场速度快、转弯半径小、爬坡能力强、施工效率高，如 4.0m 深钻孔仅需 2.0~3.0min，比传统人工风钻的 10.0min 提高 3.0~5.0 倍。

拱架立设过程中，WXHLC1215E 型拱架安装台车通过多功能拱架安装台车手臂与吊篮相结合，在保证施工质量与安全的前提下，可显著提高施工效率、降低施工成本。例如，单榀拱架的人工立设时间为 1.0h，台车仅需 0.5h；人工立设拱架需工人数量为 8 人，台车仅需 4 人配合即可。此外，台车还可辅助锚杆与风水管路安装、爆破装药及雷

达监测等多项高空作业。

4.3 仰拱施工

4.3.1 工序配套设备与性能参数

仰拱施工过程中需配套 YQS6-24m 型全液压自行式栈桥，其净空跨度为 24.0m，可通过最大车辆外宽为 3.4m，设计通过荷载为 600kN。

4.3.2 配套设备效能分析

YQS6-24m 型全液压自行式栈桥可满足一次性 12.0m 与 24.0m 2 种工况下的仰拱连续浇筑施工，提高了仰拱浇筑施工速度，循环作业时间缩短 50.0%，同时还便于隧道内部施工工序优化，便于标准化作业，减少了分区工序间相互干扰，与简易栈桥的特征对比如表 2 所示。

表 2 YQS6-24m 型全液压自行式栈桥与简易栈桥特征对比

Table 2 Comparison of characteristics between YQS6-24m fully hydraulic self-propelled and simple trestles		
对比项	YQS6-24m 型全液压自行式栈桥	简易栈桥
安全性	整体式框架结构，不易侧翻	单片散开结构，易侧翻
一次浇筑长度	12.0m 或 24.0m	12.0m
行走方式	液压控制，行走自如	需挖掘机吊装移动与摆位
施工特点	小型流水作业与掌子面可同时出渣	隧道在仰拱施工时需中断，影响掌子面出渣
优势	配合整体式仰拱模板可实现快速移动与定位	体积小，拆装灵活快捷

4.4 二次衬砌

4.4.1 工序配套设备与性能参数

二次衬砌施工过程中需配套防水板挂布与钢筋绑扎台车、液压自行式二衬台车及改装后的二衬养护台车。其中，防水板挂布与钢筋绑扎台车是一种集防水板挂设、土工布铺设及钢筋绑扎于一体的工具式作业台车，主要由行走系统、提升系统、液压系统及支架系统 4 部分构成。液压自行式二衬台车为电动机减速器自动行走，行走速度为 6.0~8.0m/min，二衬长度为 12.0m，模板幅宽为 2.0m，面板厚度为 12.0mm，脱模方式为液压油缸自动脱模。改装后的二衬养护台车为轮胎非自主行走，行走速度为 8.0m/min。

4.4.2 配套设备效能分析

防水板挂布与钢筋绑扎台车实现了 12.0m 宽幅土工布与防水板的自动安装，且铺设平整美观，比 9.0m 宽台车缩短 2.0~3.0h；钢筋可实现自动上料与精准定位，比 9.0m 宽台车缩短 6.0h，每循环作业工序减少 2 名工人。

液压自行式二衬台车的装、脱模时间加快 2.0~3.0 倍，所需操作人员数量仅为原二衬台车的 20.0%，同时设置有可调节折叠式支撑，施工效率高、劳动强度低、安全性好。此外，与混凝土分层布料机配套使用时，可实现混凝土自动化分层逐窗入模浇筑。

改装后的二衬养护台车可保证二衬脱模后能及时养护，养护过程中实时监测混凝土温度、环境温度与湿度，从而实现养护水温的智能调节，进而防止温度过高或过低导

致混凝土开裂破损。温、湿度监测过程中可根据设定时间与频率进行自动维护。当自动维护发生故障后,可切换为手动模式,进而保证养护工作正常进行。

对台车与人工养护后的二衬混凝土抗压强度进行对比,如图6所示。由图可知,相同龄期下,台车养护后二衬混凝土抗压强度显著提高,如15d龄期下,台车与人工养护后的二衬混凝土抗压强度分别为39.5,26.2MPa,台车高于人工50.76%。

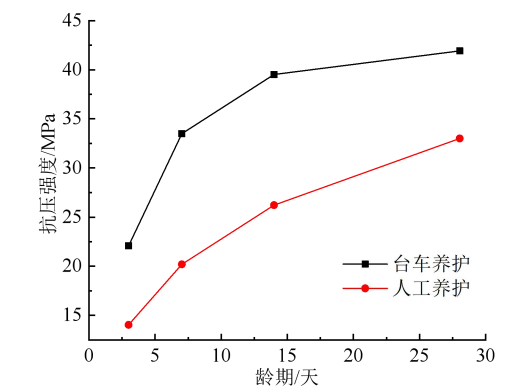


图6 台车与人工养护下二衬混凝土抗压强度

Fig.6 Compressive strength of secondary lining concrete under trolley and manual curing

5 杨家窝铺隧道施工效果分析

杨家窝铺隧道主要机械配套如表3所示。各类设备进场时间为2021年8月,截至2023年8月24日,左洞掘进1742.0m,右洞掘进2000.0m,整个施工过程均未发生任何安全事故,且施工进度较计划进度提前1个月,表明大型机械化在施工进度方面具有显著优势。

表3 杨家窝铺隧道主要机械设备配套
Table 3 Main mechanical equipment supporting Yangjiawopu Tunnel

序号	名称	型号	功率/kW	数量/台
1	半智能凿岩台车	ZX3C	288	1
2	全智能凿岩台车	ZYS113	325	1
3	湿喷台车	GHP3015E	75	1

4	锚杆台车	GZ1-II	103	1
5	混凝土泵机	三一 HBT60A	115	1
6	二衬台车	—	—	2
7	自行式仰拱栈桥	YQK 液压自行式栈桥	—	1
8	防水板台车	—	—	1
9	钢拱架安装台车	HLC212	118	1
10	自动养护台车	—	—	1
11	挖掘机	三一	103	1
12	装载机	侧卸 50	176	1
13	自卸车	18.0 m ³	272	3
14	施工台车	—	—	1
15	风机	YSDD-I No.13	264	1
16	混凝土搅拌运输车	—	257	6
17	水泵	—	15	4
18	注浆机	—	15	2

6 结语

本文依托首都环线高速公路 G95 承平段(河北承德—北京平谷)杨家窝铺隧道工程,对全断面钻爆施工采用大型机械化快速施工技术进行研究,取得如下主要结论。

1)提出“地质条件适应、环境污染低、性能匹配、功能可靠、技术先进、成本可控、通用性强”的大型机械化设备配套原则,并介绍了各项具体含义。

2)针对钻眼爆破、初期支护、仰拱施工及二次衬砌的施工工序,配套相应的机械化设备,介绍了机械设备性能参数,分析了机械设备效能。其中,钻眼爆破施工过程中创造性地采用了双机并打模式,III级围岩条件下单次循环进尺可达3.5~4.0m,施工效率显著提高。

3)杨家窝铺隧道自采用全断面钻爆机械化施工技术以来,左、右洞施工过程中均未发生安全事故,且施工进度较计划进度提前1个月。

参考文献:

- [1] 王姣娥,杜德林.服务中国式现代化的交通强国内涵解析与学科建设思考[J].经济地理,2023,43(3):6-14.
- WANG J E, DU D L. Building strong transportation network for serving Chinese-style modernization: connotation analysis and discipline development[J]. Economic geography, 2023, 43(3): 6-14.
- [2] 朱高儒,王曼,刘杰,等.我国综合立体交通网中心节点评估识别[J].科技管理研究,2022,42(12):163-168.
- ZHU G R, WANG M, LIU J, et al. Evaluation and identification of central nodes in integrated transportation network in China[J]. Science and technology management research, 2022,42(12): 163-168.
- [3] 巩江峰,王伟,黎旭,等.截至2022年底中国铁路隧道情况统计及2022年新开通项目重点隧道概况[J].隧道建设(中英文),2023,43(4):721-738.
- GONG J F, WANG W, LI X, et al. Statistics of railway tunnels in China by the end of 2022 and overview of key tunnels of projects newly put into operation in 2022[J]. Tunnel construction, 2023, 43(4): 721-738.
- [4] 张旭东.川藏铁路隧道钻爆法施工机械化设备选型初探[J].隧道建设(中英文),2019,39(S1):420-432.
- ZHANG X D. Preliminary study on selection of mechanized equipment for drilling and blasting construction of Sichuan-Tibet railway tunnel[J]. Tunnel construction, 2019, 39(S1): 420-432.
- [5] 陶伟明,曹戡,匡亮,等.川藏铁路隧道钻爆法机械化配套探究[J].铁道标准设计,2021,65(7):125-130.
- TAO W M, CAO Y, KUANG L, et al. Research on machinery matching of drilling-blasting method in Sichuan-Tibet Railway tunnel[J]. Railway standard design, 2021, 65(7): 125-130.
- [6] 刘飞香,姬海东,肖正航.川藏铁路隧道钻爆法施工成套装备技术体系研究[J].隧道建设(中英文),2021,41(8):1281-1289.
- LIU F X, JI H D, XIAO Z H. Complete set of equipment technology system for drill-and-blast tunnel construction in Sichuan-Tibet railway[J]. Tunnel construction, 2021, 41(8): 1281-1289.
- [7] 刘建国.软弱围岩全断面隧道机械化施工优化与效益分析[J].施工技术,2021,50(4):76-79.
- LIU J G. Optimization and benefit analysis of mechanized construction of full section tunnel in weak surrounding rock[J]. Construction technology, 2021, 50(4): 76-79.
- [8] 张勇.铁路山区隧道软弱围岩全断面机械化开挖技术[J].施工技术,2021,50(9):113-116.
- ZHANG Y. Full-section mechanized excavation technology of tunnel weak surrounding rock in railway mountainous area[J]. Construction technology, 2021, 50(9): 113-116.
- [9] 吴金刚,陈建芹,马杰,等.富水断层破碎带大断面隧道设计与快速施工[J].隧道建设(中英文),2022,42(S1):353-359.
- WU J G, CHEN J Q, MA J, et al. Design and fast construction technology for large-cross-section tunnel in water-rich fracture zone[J]. Tunnel construction, 2022, 42(S1): 353-359.
- [10] 陈国栋,甘目飞,刘科.铁路隧道钻爆法机械化修建设计关键技术[J].现代隧道技术,2022,59(2):200-209.
- CHEN G D, GAN M F, LIU K. Key design technologies for mechanized construction of railway tunnels by drilling and blasting method[J]. Modern tunnelling technology, 2022, 59(2): 200-209.
- [11] 王君楼.软弱围岩隧道钻爆法机械化施工关键技术及装备[J].铁道建筑,2023,63(6):94-98.
- WANG J L. Key techniques and equipments for mechanized construction of drilling and blasting tunnel in weak surrounding rock[J]. Railway engineering, 2023, 63(6): 94-98.

[12] 魏夏鹏,汪波,陈伟祥,等.软岩大变形隧道预应力锚索一体化施工设备与机械化配套工艺研究——以木寨岭公路隧道为例[J].隧道建设(中英文),2023,43(1):161-172.

WEI X P, WANG B, CHEN W X, et al.

Integrated construction equipment and mechanized supporting technology of prestressed anchor cable for Muzhailing Highway Tunnel in soft rock with large deformation[J]. Tunnel construction, 2023, 43(1): 161-172.