

河北抚宁地下厂房开挖支护机械化施工研究与应用

吴小华 冀春辉

中国水利水电第十一工程局有限公司, 河南 郑州 450001

[摘要]本文在梳理国内外水电行业地下厂房开挖支护施工工艺流程及配套施工设备的基础上,结合河北抚宁抽水蓄能电站地下厂房实际情况,引入新型机械设备并进行试行试验,形成地下厂房开挖组织策略方案,从而提升地下厂房开挖支护效率,希望本文为相关抽水蓄能电站地下厂房快速施工提供参考。

[关键词]河北抚宁; 地下厂房; 开挖支护; 机械化施工

DOI: 10.33142/ec.v8i7.17579

中图分类号: TU27

文献标识码: A

Research and Application of Mechanized Construction for Excavation and Support of Underground Powerhouses in Funing, Hebei Province

WU Xiaohua, JI Chunhui

Sinohydro Bureau 11 Co., Ltd., Zhengzhou, He'nan, 450001, China

Abstract: Based on the review of the excavation and support construction process and supporting equipment for underground powerhouses in the domestic and foreign hydropower industry, combined with the actual situation of the underground powerhouses in Funing Pumped Storage Power Station in Hebei Province, this article introduces new mechanical equipment and conducts trial experiments to form an underground powerhouse excavation organization strategy plan, thereby improving the efficiency of underground powerhouse excavation and support, so as to provide reference for the rapid construction of underground powerhouses in related pumped storage power stations.

Keywords: Funing, Hebei; underground factory building; excavation support; mechanized construction

目前,国内抽水蓄能电站建设热火朝天,抽水蓄能电站总装机容量急剧扩大,能否提高地下厂房开挖支护的施工效率,加快抽水蓄能电站的建设与投产,从而产生显著的直接经济效益,已成为一个重要问题。

已有研究表明,部分地下厂房开挖仍采用人工钻爆法,施工效率较低。因此,在基于传统人工钻爆法的基础上,考虑针对部分工序采用新型开挖支护工艺,压缩施工工序作业时间,从而提升地下厂房开挖支护效率,缩短地下厂房开挖支护工期,有力推进抽水蓄能电站安全、优质、高效建设。

1 工程概况

河北抚宁抽水蓄能电站地下主厂房可研阶段和招标设计阶段审定的开挖工期均为 28 个月,但由于当地禁爆管理要求,每年 7、8 月份开挖停工。为确保工程项目建设顺利推进,迫切需要基于地下厂房开挖支护效率提升技术,对地下厂房开挖支护施工工艺及工序优化,使施工支护工期缩短,节省工期及成本。

地下厂房钻爆法的施工开挖过程主要由钻孔、爆破、支护、出渣等主要环节构成,各环节均可利用施工设备,合理的施工装备配套既可以有效提高施工机械化程度,进而提高施工效率,保证施工质量,同时减少各工序之间的相互干扰,加强洞内通行能力,提高施工机械化程度是实现地下建筑物快速施工的关键。

2 钻爆施工设备改进措施

爆前钻孔常用设备包括手风钻与多臂钻机等。相比于更依赖人工的手风钻,多臂钻具有作业面积大、钻眼精度高及机械操作灵活等特点。对钻爆施工下多臂钻与人工手风钻开挖进行了一系列对比,结果表明,多臂钻施工可充分发空气粉尘污染小、液压冲击钻高效、伤亡事故率低的优势。

针对药卷式乳化炸药自动化装填技术及装备,国内有关厂家、高校等先后开展了卷装炸药机械化装填装置、装药台车研制和试验,但是由于卷装炸药形态、工艺特点的制约,其自动化装填仍存在药卷输送易堵管、卡死,无法实现耦合装药造成超欠挖难以控制等问题,且药卷式乳化炸药自动化装填技术难度高、大多数研究处于方案阶段,因而未能实际应用。

为解决智能化装填问题,本工程采用了一种新型装药台车,并与凿岩台车配合使用,实现钻爆一体化施工。如下图所示,装药台车由上料系统、泵送系统等组成,凿岩台车除钻进的标准硬件配置和凿岩控制软件外,额外搭载炮泥封堵系统、装填系统、装药控制软件。经过现场试验与应用,相比于人工装填卷装炸药,钻爆一体化施工设备能够在确保施工质量的前提下,将施工效率提高 12.5%。

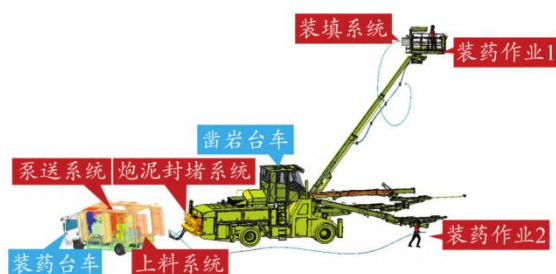


图1 一种新型装药台车

3 支护设备改进措施

地下厂房支护重点为锚杆支护技术,目前我国地下建筑物钻爆法施工工法发展历程中,机械化施工装备已在多个工序中基本普及,如洞室支护中凿岩台车开挖钻孔、锚杆台车初支、拱架台车立拱和湿喷台车喷浆等工序,已实现机械化乃至智能化施工,但仍有一些工序尚未普及机械化设备,同时,施工机械间的工序配合以及智能化程度都有待进一步研究。

3.1 凿岩台车

凿岩台车作为隧道施工中的关键装备,其自动化与智能化发展显著提升了工程效率、安全性与环保水平,已成为行业研究的重要方向。早在20世纪70年代,挪威率先开展凿岩台车自动控制技术的探索,并成功研制出试验样机及全自动微机控制系统。我国于80年代逐步引进国外先进多臂钻车,应用于矿山与重大工程建设,同时国内厂商积极研发液压掘进设备,于21世纪初成功推出门架式隧道凿岩机器人样机,标志着自主技术的重要突破。随着技术发展,学者围绕凿岩台车的定向定位控制、误差分析、钻臂运动学建模、电液控制系统及破岩机理等方面展开了系统性研究。近年来,人工智能算法的引入进一步推动了钻孔路径规划与钻臂轨迹优化,最大-最小蚁群算法、蒙特卡洛方法及RBF神经网络等被广泛应用于提升操作精度与效率。进入智能掘进时代,新型凿岩台车不仅具备随钻地质分析能力,还可依据爆破设计参数自主完成定位与钻孔作业。借助深度学习技术,台车能够基于地质样本数据进行模型训练与实时比对,实现围岩智能分级与自主优化,显著提升地质适应性与决策准确性。此外,智能系统可自动采集并分析围岩参数,结合钻孔与图像分析方法判定地质特征与稳定性,动态优化施工参数,实现数据采集、分析与反馈的一体化闭环管理。

现代凿岩台车还集成智能定位、轮廓扫描与数据远程传输等功能,依托隧道内通讯网络实现施工日志的自动上传与远程动态调控,有效应对卡钻、空打等工况问题。在我国隧道工程广泛建设的背景下,凿岩台车正进一步向全面智能化与极端工况适应能力提升的方向发展,未来将在高效掘进、地质感知、自主决策等方面持续突破,助力隧道建设迈向更高水平的自动化与信息化。

3.2 锚注台车

锚杆支护作为隧道与地下工程中的关键工序,传统上长期依赖人工作业,存在效率低、安全风险大、质量波动性强以及劳动强度高等突出问题。近年来,随着隧道工程机械化和智能化水平的不断提升,特别是在国家重大战略工程推动下,对锚杆施工的机械化与智能化需求日益迫切。在此背景下,兼具钻孔、注浆与锚杆安装等多功能于一体的锚注台车,逐渐成为行业研发与应用的重点,旨在全面提升支护作业的效率、安全性与工艺质量。在锚固加固工艺中,中空锚杆兼作注浆管的方式已获得广泛应用。该工艺通过对围岩实施外锚内注,显著增强围岩的物理力学性能与自稳能力,相比传统锚杆支护具有明显优势。锚注台车作为实现该工艺的核心装备,不仅能够完成多种类型锚杆的全机械化施工,还可适应复杂地质条件,因此备受施工单位和设备制造企业的关注。

早在20世纪末,欧洲及日本等国家已率先掌握台车设计与制造技术,并持续将先进控制技术融入设备研发中,以不断提升台车性能。例如,芬兰汤姆洛克公司生产的H530型锚杆台车,配备多机械臂和吊篮臂结构,支持驾驶室内操作或有线遥控,具有操作灵活、安装高效等特点,极大推动了施工进度。然而,受制于国际产品在国内实际工程中的适应性不足,其推广应用较为有限。

相比之下,国内锚注台车的研发虽起步相对较晚,但近年来进展显著。早期国内厂商多基于单臂钻凿设备进行功能性改造,尚未形成系统化的“钻孔-装杆-注浆”一体化施工能力。随着行业对智能化施工需求的提升,国内研究机构与企业开始致力于攻克锚注台车的关键技术。在钻臂定位与控制方面,已有研究针对智能锚注台车高自由度钻臂系统,采用D-H方法建立运动学模型,并运用蒙特卡洛法分析其工作空间,结果表明该类台车可满足绝大多数隧道断面作业要求,为自动定位提供了理论依据与实践基础。在整机研发与系统集成方面,中铁隧道局成功研制出钻-锚-注一体台车,真正实现了钻孔、锚杆安装与注浆等多工序的集成化与机械化作业。中国铁建重工推出的智能锚杆台车,则可根据预设锚杆参数完成自动定位、孔位识别、锚杆安装、智能注浆、螺母锁紧及预应力施加等全流程作业,展现出较高的自动化水平。

还有研究依托实际隧道工程,研发了集钻、锚、注功能于一体的专业化集成设备,系统探索施工工艺、方法及效能提升路径。该类设备旨在提升软岩隧道中主动支护的施工质量与速度,构建适用于高地应力、大变形地质条件的机械化支护模式,从而有效应对传统施工中进度缓慢、作业强度大及安全风险高等挑战。展望未来,锚注台车将继续向高度集成化与智能化方向发展。通过整合钻孔、注浆、锚杆及网片安装等多功能于一体,智能锚注台车将大幅减少人工作业参与,提高施工整体效率与发展质量。精

准支护定位、智能注浆控制、远程监控与运维平台等技术,将成为地下工程锚杆支护机械化的主要发展趋势,推动我国隧道工程建设向更安全、高效和智能的方向持续迈进。



图2 多功能于一体的锚注台车

4 地下厂房开挖支护机械化施工的改进方向

4.1 钻爆施工

在钻爆法机械化施工过程中,各类误时原因可归纳为地质条件、施工组织、设备管理以及设计方案等几大类。其中,不良地质条件、现场施工安排与操作水平、设备运行状态与调度效率是影响整体进度的主要方面;而设计参数如钻孔布置、支护选型等也对施工进度具有重要影响。

钻爆开挖机械化效率受到钻孔、出渣、喷浆和立架等多道工序的共同制约,这些环节彼此关联,单一工序的提速难以实现整体工效的提升。实际作业中,地质变化易导致钻孔与支护困难,施工协调不足会引起机械等待或闲置,设备故障更会直接造成作业中断。因此,提升施工效率需从系统层面出发,强调各工序间的协同性与连续性。为切实优化钻爆法施工的整体效能,应在正式施工前开展多组工效试验,通过模拟与比对不同方案,识别瓶颈工序,优化机械配置与工艺衔接,从而制定更全面、适应性更强的施工组织设计。这一措施有助于减少实际作业中的不确定性,提高山岭隧道及地下厂房开挖的机械化施工效率与整体可控性。

4.2 支护施工

本项目基于钻爆法传统设备下的支护施工工序(钻孔、插杆、注浆)循环时间进行了统计,并基于 SPSS(Statistical Product and Service Solutions)软件,对6m钻深与9m钻深工况下的支护施工时间进行统计分析,分析支护各工序权重占比,提出可提升地下厂房开挖支护(防护)施工效率的优化方向。

注浆工序的方差远大于其他两个工序,时间稳定度更差;同时,注浆工序与插杆工序的平均值离散趋势较大,但注浆工序的最大值与最小值差距更加明显,且出现了前10个施工循环时间普遍高于后15个施工循环时间的现象,

说明注浆工序的优化与施工循环数存在一定联系,且仍可能存在一定的优化空间;而钻孔工序时间始终接近平均值,已趋于稳定,优化可能较小。

综上所述,注浆工序为重点优化方向,可能与注浆工序中浆液性能、注浆压力等多种因素有关,导致时间相对稳定性较差,因此,在实际施工中,应优先考虑高效的商用浆液,确保注浆过程的稳定,以提高支护效率。

5 结语

对国内外施工工艺梳理与类似项目的考察经验表明,现有开挖支护均采用传统工艺,即基于人工钻爆法、包含钻孔、装药、通风、出渣、锚杆安插、注浆等施工工序的施工循环设计。其中,钻孔工序多采用需人工使用的传统钻机,如手风钻等;装药工序仍以人工装填为主;锚杆工序多采用双臂掘进钻机等掘进设备进行钻孔,人工配合安装锚杆及注浆。其中钻孔施工及锚杆安装占比相对较大,因此,在施工过程中严格把握钻孔、支护工序的时间是提高地下厂房开挖支护施工效率的关键。若要切实提高施工效率,需着重于提升地下厂房施工机械化程度,可优先考虑针对钻孔及锚注工序引入新型机械设备,如钻爆一体台车、高性能凿岩台车、锚注一体台车等。

对地下厂房钻爆法开挖支护各时间统计与分析表明,实际施工易受到多种因素的影响,导致施工循环时间的不稳定;同时,考虑到单纯的减少钻孔及支护工序时间应优先着重于更多的施工设备及人工投入,若要在一定施工投入的前提下提升效率,则地下厂房开挖支护施工效率优化方向应为:在控制各工序施工时间和工序切换时间的前提下,使用可集钻孔、锚杆安插及注浆为一体的流水化高效施工设备,达到提升施工效率的目的。

[参考文献]

- [1]杨世杰.超深基坑开挖与支护在机械化路桥施工中的稳定性分析及控制技术[J].交通科技与管理,2025,6(8):86-88.
 - [2]崔树坚,刘敏,周书剑.高边坡机械化快速施工及其稳定性研究[J].广东公路交通,2024,50(5):23-29.
 - [3]张全成,杨建洲.平洞钻爆法开挖支护全工序机械化智能化施工技术[J].云南水力发电,2024,40(8):111-118.
 - [4]覃彬.基于不同开挖步距的隧道机械化施工围岩稳定性分析[J].西部交通科技,2024(6):149-152.
 - [5]黎建华.隧洞大型机械化配套施工及围岩-支护体系力学响应研究[J].水力发电,2021,47(6):43-49.
- 作者简介:吴小华(1981.12—),男,高级工程师,本科,主要从事水利水电工程施工技术管理工作。