

# 智能工装洞挖施工效率提升研究

耿向斌

中国水利水电第四工程局有限公司

DOI:10.12238/hwr.v9i8.6528

**[摘要]** 在基础设施建设不断推进的当下,诸多洞挖工程面临复杂地质条件的挑战。传统施工方法在这类环境下效率低下且风险较高。智能工装的引入为解决这一难题提供了新路径。本文深入探讨复杂地质条件下智能工装在洞挖施工中的应用,分析其提升施工效率的原理、方式及面临的挑战与应对策略,旨在为相关工程实践提供参考,推动洞挖施工技术的发展。

**[关键词]** 智能工装; 洞挖施工; 施工效率

**中图分类号:** TN915.5 **文献标识码:** A

## Research on Improving the Efficiency of Intelligent Tooling Hole Excavation Construction

Xiangbin Geng

Sinohydro Engineering Bureau 4 Co., Ltd

**[Abstract]** With the continuous advancement of infrastructure construction, many tunnel excavation projects are facing challenges from complex geological conditions. Traditional construction methods are inefficient and high-risk in such environments. The introduction of intelligent tooling provides a new path to solve this problem. This article explores in depth the application of intelligent tooling in tunnel excavation construction under complex geological conditions, analyzes the principles, methods, challenges, and response strategies for improving construction efficiency, and aims to provide reference for relevant engineering practices and promote the development of tunnel excavation construction technology.

**[Key words]** intelligent tooling; Tunnel excavation construction; construction efficiency

### 引言

随着交通、水利等基础设施建设的蓬勃发展,越来越多的洞挖工程在复杂地质区域展开,如断层破碎带、岩溶发育区、高地应力软岩区等。这些复杂地质条件给洞挖施工带来了诸如坍塌、涌水、瓦斯突出等一系列难题,严重影响施工进度与安全。智能工装作为融合了自动化、信息化、智能化技术的新型施工装备,正逐渐在洞挖施工中崭露头角,有望显著提升复杂地质条件下的施工效率。

### 1 复杂地质条件对洞挖施工的挑战

#### 1.1 地质结构复杂引发的施工难题

在断层破碎带区域,由于岩石本身的结构已经极为破碎,内部的节理和裂隙广泛发育,形成了大量的不连续面,这使得岩石的整体稳定性大大降低。在这种情况下,当洞室进行开挖作业时,岩石的应力状态发生改变,极易引发坍塌事故,严重威胁施工安全和工程进度。例如,在川藏铁路隧道的施工过程中,当施工队伍穿越断层破碎带时,每天的掘进进度仅仅能够维持在1至2米的范围内,且不得不频繁地进行支护作业,这使得施工效率大幅度降低。而在褶皱构造区域,岩层的产状变化极为复杂,这给钻

孔、爆破等关键施工工序带来了极大的困难。由于岩层的不稳定性,爆破效果往往难以得到有效保证,超挖和欠挖现象频繁发生,这不仅造成了大量材料的浪费,还显著增加了后续处理工作的工作量和难度。

#### 1.2 不良地质现象增加施工风险与难度

在岩溶地区,溶洞、暗河等不良地质现象的存在,使得施工过程中面临着突水突泥的巨大风险。一旦发生突水突泥事故,不仅会导致施工场地被淹没、施工设备受到严重损坏,还可能造成施工人员的伤亡,进而延误工期数月甚至数年之久。此外,在瓦斯含量较高的地层,尤其是在部分煤矿区附近的洞挖工程中,瓦斯突出的风险时刻威胁着施工安全。为了应对这一风险,必须采取严格的通风和瓦斯监测措施,而这些安全措施的实施在一定程度上也限制了施工的进度,增加了施工的复杂性和难度。

### 2 智能工装在洞挖施工中的优势

#### 2.1 精准感知与自适应调整

智能工装配备了多种先进的传感器,如高精度的压力传感器、位移传感器、地质雷达等,它们能够实时感知并监测围岩的力学状态、地质结构变化等信息。以智能掘进机为例,它能够根

据传感器反馈的围岩硬度、节理分布等数据,自动调整刀具的转速、推进速度等关键参数,实现对不同地质条件的自适应掘进。在遇到软岩时,智能掘进机会降低刀具转速,增加推进力,以确保掘进效率;而在遇到硬岩时,则会提高刀具转速,减小推进力,从而保证掘进作业的高效性和安全性。这种自适应调整的能力,使得智能工装在复杂多变的地质条件下,依然能够保持高效稳定的作业状态。

### 2.2 高效的自动化作业流程

智能工装将传统洞挖施工中分离的开挖、支护、出渣等工序进行整合,实现了平行作业。

在支护作业方面,智能工装采用了自动化的支护系统,能够根据围岩的力学状态自动选择合适的支护方式和材料,并进行快速安装。这不仅提高了支护作业的效率,还确保了支护结构的安全性和稳定性。

此外,智能工装还实现了出渣与运输管理的自动化。通过智能调度系统,能够实时掌握出渣车辆的位置和状态,合理安排运输路线和时间,确保出渣作业的连续性和高效性。

### 2.3 有效提升施工安全性

智能工装通过集成瓦斯监测与预警系统,有效提升了施工安全性。在洞挖施工过程中,瓦斯积聚是一个严重的安全隐患,传统的监测方式往往存在滞后性和不准确性。而智能工装内置的瓦斯传感器能够实时监测施工区域内的瓦斯浓度,一旦发现浓度超标,立即触发预警系统,及时通知施工人员采取应急措施。这种实时的瓦斯监测与预警能力,不仅大大降低了瓦斯爆炸等安全事故的风险,还为施工人员提供了更加安全的工作环境。

同时,智能工装还具备智能通风控制功能,能够根据瓦斯监测数据自动调节通风设备的运行状态,确保施工区域内的空气流通和瓦斯稀释。这种智能化的通风控制措施,进一步提升了施工的安全性,也为施工的顺利进行提供了有力保障。

## 3 智能工装提升洞挖施工效率的具体方式

### 3.1 智能钻孔与爆破控制

全电脑三臂凿岩台车作为智能钻孔核心装备,集成了北斗定位系统与高精度惯性导航装置,能够实现毫米级整机定位精度,通过三维激光扫描技术自动生成隧道轮廓模型,配合智能算法完成多钻臂姿态的实时协同调整。设备启动后,钻臂可根据预设爆破设计方案,自动完成钻孔深度、角度、间距的精准施工,相比传统人工测量放样,单循环施工准备时间从4小时压缩至20分钟,效率提升达90%以上。

设备搭载的地质雷达与声波探测系统构成了动态地质分析网络,在钻孔过程中以10Hz频率采集岩石硬度、裂隙分布等数据,通过边缘计算模块实时生成地质剖面图。结合基于机器学习的爆破参数优化模型,系统可根据每孔实际地质数据,自动调整炸药类型、装药量及起爆顺序。在引江补汉引水隧道项目中,通过该智能系统每循环进尺效率提升21%。

### 3.2 智能化支护作业

智能拱架一体台车成功构建了全流程自动化支护体系,实

现了从钢架吊装到拼接、锚杆钻注安装的全方位自动化管理。该三臂三篮拱架安装采用了先进的六自由度机械臂技术,配备了高精度的视觉识别系统和力反馈装置,能够在复杂多变的光照条件下,精准识别并锁定钢架的关键特征点。凭借其毫米级的定位精度,该设备能够高效完成重达121吨的钢架吊装与拼接任务,拱架安装功效从原来人工8人每班3~4小时缩短至3人1.5~2小时,拼装误差控制在3毫米以内,极大地提升了预拼装的精度,同时将工人在掌子面的暴露时间减少60%,确保了施工的精准性和安全性。

### 3.3 智能出渣与运输管理

智能出渣系统融合了无人驾驶技术与物联网管理平台。电动铲运机搭载激光雷达与视觉感知系统,能够在无GPS信号的隧道环境中实现厘米级定位,通过强化学习算法动态规划铲装路径,相比人工操作效率提升40%。智能运输车队配备V2X通信模块,可实时感知洞内500米范围内的车辆位置、速度及路况信息,通过多目标优化算法生成最优调度方案,使运输效率提升35%。

信息化管理平台集成了北斗定位、UWB室内定位与5G通信技术,可实时监控每台运输车辆的油耗、行驶里程、设备健康状态等20余项参数。在川藏铁路某隧道施工中,该系统将出渣效率从每小时60立方米提升至85立方米,通过优化调度减少设备空驶里程30%,同时实现全流程碳排放可追溯。

## 4 复杂地质条件下智能工装应用面临的挑战

### 4.1 设备适应性问题

复杂多变且极具挑战性的地质环境对智能工装设备提出了极为严苛的考验。在极端地质条件下,例如高地应力软岩大变形地段,常规的智能支护设备难以满足实时变形控制的需求,迫切需要开发具备自适应刚度调节功能的新型装备。这不仅对研发周期和成本控制构成了双重挑战,还增加了技术研究的复杂性和经济压力,使得设备适应性问题成为智能化施工中亟待解决的关键难题。

### 4.2 技术人才短缺

当前,行业内人才结构矛盾尤为突出,调研数据显示,仅有12%的一线施工人员具备智能设备的操作能力,这一比例远低于实际需求,暴露出人才短缺的严峻现状。由于操作技能不足,设备故障的平均修复时间长达8小时,这不仅严重影响了施工效率,还直接拖累了项目进度。高校相关专业的课程体系仍然以传统施工技术为主,缺乏智能感知、数据分析等交叉学科内容,导致应届毕业生在进入职场后需要经过18个月以上的系统培训才能胜任智能设备操作岗位。企业内部在人才培养方面存在明显断层,缺乏系统的技能认证体系和完善的培训机制,复合型人才的流失率高达25%,进一步加剧了人才短缺的困境。这种人才供需的严重失衡,使得技术人才短缺成为制约智能化施工发展的瓶颈。

### 4.3 前期投入成本高

三臂全电脑钻机、湿喷机、拱锚台车等大型工装设备,虽然在智能化施工中展现出显著优势,但其高昂的购置成本往往令

许多施工单位望而却步。这些设备不仅初始投入巨大,而且在维护保养、配件更换等方面也伴随着持续的经济支出。尤其是在项目初期,资金压力尤为突出,施工单位需要在有限的预算内平衡设备投入与施工进度,这无疑增加了项目管理的难度。此外,智能化施工所需的软件系统、传感器、数据处理平台等也是不可忽视的前期投入,这些软硬件的结合才能构成完整的智能化施工体系,进一步提升施工效率和质量。尽管前期投入成本较高,但从长远来看,智能化施工带来的施工效率提升、成本节约、安全保障以及质量优化等方面的优势,将逐渐弥补并超越初期投入的成本,为施工单位带来更为可观的经济效益和社会效益。

## 5 应对挑战的策略

### 5.1 加强设备研发与优化

为了全面提升智能洞挖装备的技术水平和应用效果,必须建立一套完善的“政产学研用”协同创新机制。政府、企业、高校、科研机构及用户应共同参与,形成合力。政府应加大对智能洞挖装备研发的政策支持和资金投入,鼓励企业加大技术创新力度,推动关键技术的突破。企业应加强与高校和科研机构的合作,共同开展技术研发和成果转化,加速智能洞挖装备的升级换代。同时,积极收集用户反馈,不断优化产品性能,提高设备的适用性和可靠性。通过协同创新,推动智能洞挖装备向更高效、更智能、更环保的方向发展。

### 5.2 强化专业人才培养

为了满足智能建造领域对高素质人才的需求,教育部积极推动全国范围内15所高校开设智能建造专业,并构建了一套“理论教学+虚拟仿真+现场实训”三位一体的培养模式,确保学生在校期间能够获得全面而扎实的专业知识和实践技能。与此同时,企业与职业院校紧密合作,共同建设产业学院,开展“订单式”人才培养,根据企业实际需求量身定制培养方案,并实施“导师制”带教计划,由经验丰富的工程师一对一指导学生,提升其职业素养和实操能力。为了进一步提升人才的职业认同感,建立行业统一的技能认证体系,设立智能建造工程师职称序列,为人才提供清晰的职业发展路径。

### 5.3 合理控制成本

在智能工装的应用初期,高昂的研发和购置成本往往成为制约其推广的关键因素。因此,合理控制成本是提升智能工装应用效率不可或缺的一环。首先,政府可通过税收优惠、补贴政策等经济手段,减轻企业在智能工装研发和应用初期的财务负担。同时,鼓励企业采用融资租赁等灵活的融资方式,降低一次性投入成本。其次,企业应注重成本控制,优化生产流程,提高生产效率,从而降低智能工装的制造成本。此外,加强供应链管理,与供应商建立长期稳定的合作关系,争取更优惠的采购价格,也是控制成本的有效途径。最后,推动智能工装的标准化和模块化设计,提高零部件的通用性和互换性,减少定制件的使用,进一步降低生产和维护成本。通过这些措施,实现智能工装成本的有效控制,加速其在复杂地质条件下洞挖施工中的广泛应用。

## 6 结论

在复杂地质条件下,智能工装的应用为洞挖施工效率的提升带来了新的契机。通过精准感知地质条件、实现自动化作业流程,智能工装在钻孔爆破、支护、出渣等各个施工环节发挥着重要作用,显著提高了施工效率,降低了施工风险。然而,目前智能工装在应用过程中仍面临设备适应性、技术人才短缺和成本高等挑战。通过加强设备研发与优化、强化专业人才培养以及合理控制成本等策略,能够有效应对这些挑战,推动智能工装在复杂地质条件下洞挖施工中的广泛应用,促进洞挖施工行业向智能化、高效化方向发展,为我国基础设施建设提供强有力的技术支撑。

## [参考文献]

- [1]焦小年,贺海鸿,相里海龙,等.复杂地质条件下煤矿多元灾害智能协同治理模式[J].国企管理,2025,(06):107-112.
- [2]金圣熙.复杂地形地质条件下岩土工程智能勘察技术的应用[J].智能建筑与智慧城市,2025,(02):79-81.
- [3]欧阳辉.复杂地质条件下深基坑支护智能安全技术研究[J].新城建科技,2024,33(12):159-161.

## 作者简介:

耿向斌(1980--),男,汉族,山西天镇县人,本科,高级工程师,研究方向:水利水电施工及管理在智能应用、精细管理、创新引领模式下的新质生产力研究。