

全工序机械化装备体系在高原铁路隧道施工中的应用研究

陈秋林

中铁三局集团有限公司, 山西 太原 030000

[摘要]随着我国铁路和公路隧道建设规模的不断扩大,传统依赖人工与单机作业的施工方式已难以满足高原、长大隧道复杂环境下的效率与安全要求。以高原铁路为代表的高原隧道工程,通过引入全工序机械化装备体系,实现了开挖、支护、衬砌、养护等环节的流水线式施工。文中在分析隧道施工环境特点的基础上,结合高原铁路的工程实践,系统总结了全工序机械化装备体系的构成、应用成效与管理模式,并提出了优化与发展方向。研究表明,该体系不仅显著提升了施工效率和质量,还推动了施工组织模式向智能化、信息化方向转型。

[关键词]隧道施工;全工序机械化;高原铁路;装备体系;智能建造

DOI: 10.33142/ec.v8i7.17581

中图分类号: TU752

文献标识码: A

Application Research on Fully Mechanized Equipment System in High-altitude Railway Tunnel Construction

CHEN Qiulin

China Railway No. 3 Engineering Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030000, China

Abstract: With the continuous expansion of railway and highway tunnel construction scale in China, the traditional construction methods relying on manual labor and single machine operation are no longer able to meet the efficiency and safety requirements in complex environments such as high altitude and long tunnels. The plateau tunnel engineering represented by the plateau railway has achieved assembly line construction in excavation, support, lining, maintenance and other aspects by introducing a fully mechanized equipment system for the full process. On the basis of analyzing the characteristics of tunnel construction environment and combining with the engineering practice of high-altitude railways, this article systematically summarizes the composition, application effectiveness, and management mode of the full process mechanized equipment system, and proposes optimization and development directions. Research has shown that this system not only significantly improves construction efficiency and quality, but also promotes the transformation of construction organization models towards intelligence and informatization.

Keywords: tunnel construction; mechanization of the full process; high-altitude railway; equipment system; intelligent construction

引言

隧道工程是交通基础设施建设中的关键环节,尤其在山岭重丘和高原地区,大量长大隧道的修建对区域交通和经济发展具有重要意义^[1]。然而,与地面施工相比,隧道施工面临着更加复杂的自然环境与施工条件。在海拔地区,低氧、低压和低温等环境因素叠加,使得施工设备的有效功率明显下降,仅为平原地区的约 67%,循环作业时间增加约 52%,施工安全风险和劳动强度显著提高。这些不利条件不仅影响施工进度,也直接威胁到施工人员的身体健康和工程质量。

长期以来,我国隧道施工多以人工配合单机作业为主,这种模式在短隧道或地质条件较好的工程中尚适用,但在高原铁路等高原长大隧道项目中,其不足日益显现^[2-3]:一方面,人工劳动强度大,易导致作业效率低下和安全事故频发;另一方面,单机作业缺乏系统性,各工序之间衔接不畅,影响整体施工周期和工程质量。随着我国基础设施建设规模的不断扩大,亟需一种更加高效、安全、系统

的施工组织方式^[4-5]。

为此,高原铁路在隧道施工中全面引入了全工序机械化装备体系。该体系涵盖超前地质预报、钻爆开挖、初期支护、锚杆安装、二次衬砌到养护等八条作业线,构建了“成套化装备+标准化工艺+信息化管理”的施工新模式。与传统方式相比,全工序机械化不仅能实现各工序间的高效衔接和流水线作业,还能通过机械化替代人工在高风险环境下的直接作业,显著提升施工安全性与效率。

更为重要的是,全工序机械化装备体系的引入,不仅缓解了高原施工环境对人机效能的制约,还推动了隧道施工模式由“经验驱动”向“装备驱动”和“数据驱动”转型。这一实践为高原铁路等重大工程的顺利实施提供了有力支撑,也为我国长大隧道建造提供了可复制、可推广的范例,对实现交通强国战略目标具有重要意义。

1 全工序机械化施工的必要性

高原隧道施工条件远比普通隧道复杂。首先,低氧环境导致设备性能下降:在海拔 3000m 以上,洞口含氧

量随海拔每升高 1000m 下降约 1.6%，洞内更因通风受限而降低，燃油动力设备有效功率仅为平原的 60%~70%，施工周期被迫延长。其次，工效下降显著，高原铁路长大隧道循环作业时间普遍比平原增加 40%~50%，加之低温高湿环境使混凝土养护难度加大，进一步拖慢进度。再者，复杂地质条件下安全风险极高，坍塌、涌水等灾害频发，施工人员长时间进入掌子面，劳动强度与事故隐患并存。

在此背景下，引入全工序机械化至关重要。凿岩台车、湿喷机械手、衬砌台车等流水线化衔接可缩短循环时间、提升精度与质量，并以机械替代人工进入高危区域，显著降低风险。同时，它推动施工模式由“人工+单机”向“系统化+智能化”转型。

综上，全工序机械化不仅能突破高原环境制约，更是隧道施工现代化的必然路径。图 1 展示了高原铁路隧道施工的典型环境特征。

2 装备体系构成与功能分析

全工序机械化装备体系的核心在于对隧道施工各工序的成套化覆盖与有机衔接。从超前地质预报、钻爆开挖，到初期支护、锚杆施工，再到二次衬砌和后期养护，均配备了专用机械设备，构建了一条完整的作业链条。与传统“人工+单机”的割裂模式不同，这一体系实现了工序之间的无缝衔接，大幅提升了整体施工效率和质量。

表 1 展示了典型作业线装备的配置与工效表现。其中，

XR100G 多功能钻机能够在复杂围岩条件下完成 100m 深的超前地质预报钻孔，显著提升地质掌握程度；DJ3E 凿岩台车则采用三臂全电脑控制系统，能够在 2 小时 20 分钟内完成 150 个炮孔钻进，保证了爆破施工的高效与精准；在初期支护环节，HP3017G 湿喷机械手的喷射效率可达 30m³/h，且混凝土回弹率降至 8%，有效改善了材料利用率和支护质量；MT1G 钻锚注一体机实现了钻孔、安装与注浆一体化操作，单根锚杆施工时间缩短至 6min，合格率达到 98% 以上；在衬砌工序中，智能衬砌台车能够实现多点自动布料和实时监控，保证了二衬混凝土成型的稳定性与合格率；而蒸汽养护台车则通过恒温恒湿条件的维持，使二衬混凝土内部不产生裂缝，进一步提升了结构耐久性。

从表 1 可以看出，全工序机械化装备不仅覆盖了隧道施工的各个环节，而且在效率、精度与质量控制方面均表现出显著优势，形成了一条系统化、标准化的施工工艺链。这种体系的引入，标志着隧道施工正逐步向装备成套化和工艺一体化方向发展。

与此同时，图 2 展示了 DJ3E 凿岩台车在施工现场的应用情况。该设备通过多臂协同钻孔和激光定位技术，能够实现炮孔布置的高精度控制，有效减少超欠挖现象，并为后续爆破作业创造了良好的条件。由图 2 可以直观地看到，凿岩台车替代人工钻孔作业后，不仅降低了工人暴露在掌子面危险环境中的时间，还显著提升了作业效率与安全性。



图 1 高原铁路隧道施工环境示意图

表 1 典型作业线装备配置与工效表现

作业线	关键装备	性能指标	工效表现
超前地质预报	XR100G 多功能钻机	钻深 100m	钻进速度达 15~50m/h，单次取芯长度 4m，取芯速度 1.5~5m/h，36m 探孔 4h 完成。
开挖	DJ3E 凿岩台车	孔径 43~140mm，孔深 2.4~4.8m	平均每循环 150 孔打钻耗时约 2.5h，较传统施工减少劳力 10 人。炮孔残留率 达到 90% 以上，平均线性超控控制在 20cm 以内。
初支	HP3017G 湿喷机械手	喷射效率 30m ³ /h	单循环喷浆 3 榦，分区喷射混凝土 36m ³ ，工效可控制在 2.5h 以内，回弹率降至 8%
锚杆施工	MT1G 钻锚注一体机	单根锚杆 6min 完成	单根低预应力树脂锚杆施工时间由 15~20min 降至 6.5min 以内，每循环锚杆施工时间控制在 4h 以内，劳力由 8 人减至 3 人，合格率≥98%
衬砌	智能衬砌台车	多点自动浇筑+监控	实现分层逐窗入料、平板振捣+插入式振捣，二衬合格率 100%
养护	蒸汽养护台车	恒温 25~35℃，湿度≥90%	全封闭包裹，智能化恒温恒湿调节，二衬无裂缝、错台等



图2 DJ3E 凿岩台车施工现场

3 施工应用与管理实践

3.1 装备配置情况

在高原铁路隧道项目中，全工序机械化装备体系得到了全面部署。根据统计，项目共配置机械设备 139 台套，涵盖凿岩台车、湿喷机械手、拱架安装台车、智能衬砌台车、养护台车及其他配套设备。这种大规模成套化投入，确保了各工序能够实现机械化覆盖，形成了完整的施工链条。

表 2 展示了全工序机械化装备的具体配置情况。其中，凿岩台车共计 15 台，平均每个掌子面配备 2 台，保证了钻爆作业的连续性；湿喷机械手共 23 台，每个工作面均配置 1 台，用于快速完成初期支护；拱架安装台车 18 台，通过多棍预拼和激光定位技术，提高了拱架安装的精度和效率；衬砌台车 13 台，配备智能监控和带模注浆系统，确保二衬施工质量；养护台车 11 台，采用蒸养与喷淋组合方式，为混凝土养护提供稳定条件。此外，还配置 59 台其他装备，包括钻机、防水板台车等，以满足特殊工序需求。

表 2 全工序机械化装备配置情况

装备种类	数量	配置特点
凿岩台车	15 台	三个工作面 2 台，炮孔残留率达到 90% 以上
湿喷机械手	23 台	每工作面配置 1 台，降低初喷回弹率、减少粉尘污染
拱架安装台车	18 台	两个工作面配置 1 台，多棍预拼+激光定位、三点精确定位、机械抓取
衬砌台车	13 台	每工作面配置 1 台，高频振捣系统、自动浇筑、信息集成传输系统、可视化监控等
养护台车	11 台	每工作面配置 1 台，智能温湿度控制系统、自动行走系统、智能蒸养+喷淋养护
其他装备	59 台	含多功能钻机、防水板台车、移动除尘设备等

从表 2 可以看出，这一配置实现了“1 套工装覆盖 1 个掌子面”的目标，为施工连续性和均衡推进提供了有力保障。与传统施工方式相比，该体系显著减少了工序间等

待时间，提高了设备利用率和整体施工效率。

与此同时，图 3 展示了 HP3017G 湿喷机械手在施工现场的应用情况。通过机械臂的自动化喷射作业，该设备能够保持喷层厚度均匀，回弹率控制在 8% 左右，大大改善了材料利用率和支护效果。从图中可直观地看到，湿喷机械手替代人工喷射作业后，不仅降低了工人暴露在掌子面危险区域的时间，也显著提升了初期支护的效率与安全性。



图3 HP3017G 湿喷机械手施工

3.2 管理与保障措施

在装备配置基础上，项目部实施多项创新管理措施以保障全工序机械化高效运行。首先推行“三自管理模式”（设备自有、人员自管、管理自主），增强了施工单位的自主掌控与执行力。其次，通过大机写实记录、优化管线与作业区布置、提前完成风水电准备，实现工序“零交接”，有效减少等待时间。在安全与质量方面，建立“月度考核+两级维保”机制，提升设备完好率并压实责任。最后，将操作手培训与考核常态化，并结合薪酬激励，既缓解了高原施工人员不足，又提升了积极性与责任心。

4 存在问题与优化方向

尽管全工序机械化在高原铁路隧道施工中成效显著，但仍存在不足。首先，维修保障困难突出，进口设备零部件供应周期长、成本高，易影响进度。其次，高水平操作人才不足，施工仍依赖少数技术骨干，人员短缺直接影响质量与工期。再次，国产设备在低氧、低温及复杂地质条件下的稳定性和适配性不足，故障率偏高，有待优化升级。

针对上述问题，提出了若干优化措施。表 3 总结了当前存在的主要问题及对应的解决策略。例如，针对维修保障困难，可建立“配件库超市化”模式，并设立专项维保资金，以缩短零部件供应周期；针对操作人才不足，可通过强化培训与薪酬激励机制，吸引并留住高技能操作手；而对于国产设备适应性差的问题，则需加强研发与施工现场的联动，推动设备迭代升级，逐步提升可靠性与智能化水平。

表 3 存在问题与优化措施

问题	影响	优化措施
维修保障困难	设备停工影响进度	建立配件库,驻场厂家服务
操作人才不足	施工质量与进度不稳	强化培训与激励机制
国产设备适应性差	高原工况故障率高	研发升级+现场联动

与此同时,设备优化的方向不仅体现在技术升级,还包括施工工艺的改良与管理模式的创新。例如,智能衬砌台车已在部分项目中得到成功应用。图 4 展示了智能衬砌台车的现场应用情况,可以看到其通过自动布料、实时监控和带模注浆等功能,显著提高了二次衬砌的施工精度与稳定性。这类智能化设备的应用,正是未来国产装备发展与优化的方向。


图 4 智能衬砌台车现场应用

5 结论

全工序机械化装备体系在高原长大隧道施工中有效

提升了施工效率与安全性,实现了工序标准化和流水线作业。在高原铁路中,该体系缩短了施工周期、降低了劳动强度,并保障了隧道结构质量。通过“三自管理”模式和完善的维保体系,设备利用率显著提高。未来应进一步推动国产设备升级与智能化应用,同时加强高技能操作人才培养,以构建更加高效、可靠和智能化的隧道施工体系。

[参考文献]

- [1]郭世杰.高速铁路隧道全工序智能装备机械化配套施工方法研究[J].自动化应用,2025,66(9):147-149.
 - [2]孔文亚,周立新,王君楼.高速铁路隧道钻爆法机械化施工关键技术和装备[J].铁道建筑,2024,64(6):109-113.
 - [3]胡莲.贵广铁路隧道套衬施工装备研制及应用[J].铁道建筑技术,2024(2):190-193.
 - [4]刘飞香.钻爆法隧道施工装备技术进展与展望[J].现代隧道技术,2024,61(2):190-202.
 - [5]林志,谭忠,郝理.山岭隧道施工的分步式与整体式机械化[J].科学技术与工程,2019,19(36):62-72.
- 作者简介:陈秋林(1991.7—),男,汉族,籍贯:重庆市潼南区,西南交通大学机械设计制造及自动化,2011级本科生,中铁三局集团有限公司石雄铁路 SXZQ-1 标项目经理部机械部部长。