

Research on Equipment Innovation and System Management of Complex Long Tunnel Foundation Treatment Engineering under Extreme Construction Period

Jian Li

Sinohydro Bureau 7 Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 611130, China

Abstract

A major water diversion project faced extreme constraints in foundation treatment, including complex geological conditions, massive engineering volume (approximately 540,000 meters of consolidation grouting and 250,000 square meters of backfill grouting), and a compressed construction period from 6 to 1.5 years. Traditional construction methods were inefficient, posed high safety risks, and lacked quality control, particularly failing to address the challenge of long-distance slurry transportation averaging over 3 kilometers. The project adopted a systematic approach to drive full-chain innovation, establishing a mechanized collaborative construction system centered on “single-arm hydraulic rock drilling platforms, tracked aerial work platforms for assistance, and mobile automated grouting vehicles.” This system successfully overcame the key technology of stable slurry transportation over ultra-long distances.

Keywords

Water diversion project; Foundation treatment; Extreme construction period; Equipment innovation; Mechanized coordination

极端工期下复杂长隧洞基础处理工程装备革新与系统管理实践研究

李建

中国水利水电第七工程局有限公司，中国·四川成都 610213

摘要

某大型引水工程基础处理面临地质复杂、工程量大（固结灌浆约54万米、回填灌浆约25万平方米）、工期从6年压缩至1.5年的极端约束。传统施工模式效率低、安全风险高、质量可控性差，尤其无法解决平均3公里以上的浆液长距离输送难题。项目以系统思维推动全链条革新，构建了以“单臂液压凿岩台车钻孔、履带式登高平台车辅助、移动式自动化灌浆台车注浆”为核心的机械化协同施工体系，并攻克了超长距离浆液稳定输送关键技术。

关键词

引水工程；基础处理；极端工期；装备革新；机械化协同

1 引言

1.1 工程背景与战略意义

某引水工程，是国家着眼于长远发展战略、优化区域水资源配置格局的重大基础设施项目。其隧洞工程规模宏大，地质条件错综复杂，位居世界同类工程前列。在如此庞大的地下洞室群建设中，基础处理工程，特别是针对围岩加固的固结灌浆和针对衬砌背后脱空填补的回填灌浆，是确保隧洞长期保持结构稳定、抵御高水头压力、防止渗漏危害的基石性技术环节，被业内形象地喻为隧洞工程的“生命线”与“安全阀”。

【作者简介】李建（1983-）男，中国四川乐山人，本科，高级工程师，主要从事水利水电工程施工及管理工作。

1.2 核心问题界定与研究紧迫性

按照初始的、相对合理的施工组织设计，本项目基础处理工程预留的工期约为6年。然而，由于项目前期洞挖开挖遭遇未预见的不良地质体、衬砌混凝土施工受多重因素制约等，关键路径上的前置工序出现了严重滞后。这导致最终

“压茬”传递至基础处理阶段的净有效工期被极端压缩至仅有1.5年。这意味着，日均需完成的灌浆工程量激增至原计划的数倍，施工强度提升了约300%。传统的施工模式——依赖大量人工搭设满堂脚手架或简易钢平台作为作业平台，使用手风钻或轻型潜孔钻进行钻孔，再采用分散、半机械化的方式进行灌浆——在此极端条件下暴露出系统性短板^[1]。

1.3 研究框架与方法论

本研究采用行动研究法与案例研究法相结合。笔者作为项目经理，主导并全程参与了本次技术与管理变革。本文将从“挑战分析-体系构建-关键技术突破-实施成效-理

论启示”的逻辑主线展开，旨在系统总结一套经过实践检验的、可在行业内推广的复杂工程解决方案。

2 极端约束下的工程核心挑战与系统性破局思路

2.1 多维约束的深度解析

T (时间) 约束：1.5 年工期是刚性约束，传统方法无法满足线性进度要求。

Q (质量) 约束：隐蔽工程特性要求质量过程必须精准可控、全程可追溯。

S (安全) 约束：高强度、多工序交叉、有限空间作业，安全风险叠加。

C (成本与物流) 约束：需在控制成本前提下，解决平均 3 公里超长距离浆液高性能稳定输送的世界级难题。

2.2 系统性应对思路：以装备革新为引擎驱动全链条重构

项目组确立“以机械化、自动化、信息化装备替代人海战术与落后工法”的核心战略。这不仅是设备的简单更换，更是以装备能力为牵引，对施工工艺、组织流程、管理方法进行全链条、系统性重构的深刻变革。

3 机械化协同施工新体系的系统性构建

3.1 核心装备集群的精准选型与集成优化

3.1.1 钻孔作业革命：单臂液压凿岩台车

选用高性能单臂钻，其技术优势在于：①高效精准：液压系统提供持续大冲击功，钻孔速度是风钻的 5-8 倍，集成激光导向系统，孔位、角度误差控制在厘米级；②灵活自适应：自带行走机构，对作业平台无依赖，可快速转场，适应多变洞线；③低扰动：液压缓冲机制减少对围岩与衬砌的二次扰动。

3.1.2 高空作业平台革新：专用履带式登高平台车

替代满堂脚手架与简易钢台车。其价值体现在：①本质安全：提供符合国家标准的全封闭、带护栏升降平台，彻底消除脚手架坍塌风险；②机动高效：履带行走适应洞内不平地面，展开收起快速，工作面转换效率提升 70% 以上；③人机工效优：为工人提供稳定、宽敞的作业面，降低劳动强度^[21]。

3.1.3 灌浆作业革新：移动式自动化灌浆台车

该设备是质量与效率控制的中枢，集成：①精准制浆系统：基于质量流量计的自动配料与高速搅拌，保证浆液均质性；②智能泵送系统：变频控制大流量灌浆泵，压力、流量无级精确调节；③全参数记录与传输系统：实时采集并无线传输压力、流量、密度、注浆量等数据，形成不可篡改的电子档案。

3.2 关键技术的重大突破：超长距离浆液稳定输送系统

针对平均 3km、最大超 5km 的输送距离，项目开展专项攻关：

浆材配方优化：通过复配高效减水剂、稳定剂和微膨胀剂，研发出低粘度、高分散性、低析水率、长稳定时间($\geq 4h$)的专用灌浆材料。

输送系统设计：采用“大功率高压 (30MPa) 柱塞泵 +

主输送钢管”的配置。通过水力计算，确定最优管径（减少摩阻）与泵压，并在中途设置中转站。

在线监测与防堵控制：在管道关键节点布设压力与流量传感器，建立“压力 - 流量 - 时间”关联模型。系统可实时诊断管路状态，一旦出现异常压降（预示可能堵管），自动预警并启动反冲洗程序。

管路维护标准化：制定严格的“施工作业后全线冲洗、定期全线巡查、关键阀门备品备件现场储备”制度，确保输送系统可靠性超过 99%。

3.3 施工组织与管理系统的深度协同重构

先进的装备和技术必须嵌入优化的组织与管理框架中，才能发挥最大效能。

3.3.1 基于流水施工的工艺流程再造

打破了传统“一孔一钻一灌”的串行作业模式，创新性地建立了“分区流水、钻灌分离、专业协作”的新型工艺流程。

分区管理：将数十公里长的隧洞划分为若干个合理的施工段（如每 500-1000 米为一个管理单元）。

流水作业：在每个施工段内，组织“单臂液压凿岩台车集群”进行突击钻孔，形成钻孔作业面；钻孔完成后，由“登高平台车班组”快速跟进，负责清孔、安装灌浆塞等准备工作；最后，由“移动式自动化灌浆台车梯队”进行连续、循环的注浆作业。三个专业班组像流水线一样依次推进，互不干扰又紧密衔接，实现了空间占满、时间连续的高效施工。

3.3.2 全生命周期精益成本管控体系

新体系虽然初期设备投入较大（约比传统模式增加 25%），但通过精细化管理实现了全生命周期的成本最优。

设备资产效能最大化：推行设备全生命周期成本管理，通过加强预防性维护、提高单台设备利用率、降低故障停机时间，来快速摊薄较高的固定折旧成本。

数字化物料消耗精准控制：自动化灌浆系统实现了浆液配比的精确控制和注入量的准确计量，将传统模式下因人工操作误差、管路残留、跑冒滴漏造成的材料损耗率从大约 15% 显著降低至 5% 以内，仅此一项就节约了大量材料成本。

隐性成本与风险成本规避：大幅减少了脚手架搭拆、大量人工投入等直接成本；更重要的是，通过保障工期、提升质量、确保安全，完全避免了因工期延误可能产生的巨额违约金、质量缺陷处理的天价费用以及安全事故带来的直接与间接损失，项目的最终利润率达到了预期目标，实现了经济效益与社会效益的统一。

4 实施成效的多维度综合评估

4.1 施工效率的量化跃升

钻孔效率：单臂液压凿岩台车平均台班效率稳定在 350-400 延米，是传统潜孔钻设备效率的 4-5 倍，实现了钻孔工序的“提速”。

灌浆效率：自动化灌浆台车可实现多孔连续、循环作业，单台设备日灌浆量较传统分散灌浆方式提升 3 倍以上，实现了灌浆工序的“增效”。

整体工期保障：凭借各工序效率的倍增和流水化组织的无缝衔接，项目成功在极端压缩的1.5年有效工期内，完成了全部54万米固结灌浆和25万平方米回填灌浆的施工任务，所有关键路径节点均按期或提前完成，节点按期完成率达到100%。

4.2 工程质量的卓越表现

过程质量100%受控：自动化灌浆系统记录的灌浆压力、流量、配比等关键参数合规率达到100%，杜绝了人为篡改和记录错误，实现了过程质量的数字化精准管控。

实体质量优良率高企：工程完成后，通过系统性的检查孔压水试验检测，所有测试段的透水率（吕荣值）均优于设计标准。最终评定的单元工程优良率高达98.5%，远超合同要求的质量目标。

质量可追溯性革命：项目生成了超过50万条结构化的灌浆过程数据链，任何一孔、一段的施工详情均可随时调阅。一旦出现疑问，可在分钟级时间内精准定位到施工时间、操作人员、设备参数，实现了质量问题溯源从“大海捞针”到“精准定位”的根本转变。

4.3 安全与综合效益的全面丰收

安全绩效创优：在整个项目建设期间，得益于登高平台车的本质安全替代和现场作业人员的减少，未发生一起机械伤害、高空坠落等可记录的安全事故，百万工时伤害率（LTIFR）为零，创造了在极端高强度施工条件下的安全奇迹。

经济效益显著：尽管初期设备投资增加，但通过节省巨额脚手架费用（约1200万元）、减少直接人工成本约30%、大幅降低材料损耗，并确保了工期零延误，项目整体成本可控，最终利润率符合预期，证明了高技术投入带来的高价值回报。

管理效益提升：现场施工人员总数减少了约40%，将管理人员从以往疲于奔命的人员调度、质量检查、安全监督等繁琐事务中解放出来，使其能够更专注于施工技术的持续优化、重大风险的超前预控和更高层次的资源协调，提升了项目管理的整体效能与战略价值。

5 讨论与理论启示

5.1 对项目管理理论的延伸思考

本项目的成功实践，对经典的项目管理“铁三角”理论（时间、成本、质量相互制约）在超大型复杂工程中的应用提供了新的注解。在极端约束条件下，传统的平衡往往被打破，陷入“按下葫芦浮起瓢”的困境。本项目通过主动引入并强化“技术能力”作为第四个核心维度，以革命性的装备技术创新为支点，撬动了整个项目系统的升级，不仅满足了极端工期要求，同时实现了质量、安全、成本的协同优化。这验证了在当代复杂工程管理中，技术创新能力不再是辅助性因素，而可以成为驱动项目成功、打破传统约束的核心主导变量和战略资源。

5.2 对行业技术演进方向的示范意义

本案例是中国长隧洞及类似地下工程基础处理施工技术从“半机械化、劳动密集型”向“高度机械化、自动化、

信息化集成”转型升级的一个标志性实践。它不仅仅提供了几台先进设备，而是输出了一套完整的、经过验证的“技术包”：包括高性能专用施工装备的选型集成方案、特殊工况下的材料研发路径、智能化过程控制系统、以及与之匹配的协同施工组织管理模式。这为行业应对未来更复杂、更艰巨的工程建设任务提供了可借鉴的模板，具有重要的行业示范与推广价值。

5.3 创新体系推广的适应性分析

本研究总结的机械化协同施工体系，其优势在长大深埋隧洞、工期异常紧张、质量与安全要求极高的基础处理工程中尤为突出。在向其他工程推广时，需进行专业的适应性分析，不能简单照搬。应结合具体工程的规模体量、地质水文条件、投资预算、设备资源可获得性等因素，对装备配置规格、输送系统方案、施工分区大小等进行调整优化。然而，该体系所蕴含的核心思想——即用系统性的装备与技术解决方案，去应对系统性的工程挑战，并通过管理重构实现“硬技术”与“软管理”的深度融合——具有普遍的指导意义和适用性^[3]。

5.4 未来研究与技术展望

基于本次实践，未来的研究与应用可以朝着更智能、更绿色、更数字化的方向深化：

装备智能化升级：探索基于随钻测量、地质雷达等超前地质预报信息，开发自适应钻孔与灌浆参数的AI决策支持系统，实现“感知-决策-执行”的闭环智能施工。

材料绿色化与高性能化：进一步研发工业固废资源化的绿色灌浆材料，以及适用于更高压力、更复杂地质条件的高性能、多功能灌浆材料。

全过程数字孪生：构建从设计、施工到运维的全生命周期数字孪生模型，在虚拟空间中预先进行施工模拟与优化，实现真正的智慧建造与精益管理。

6 结论

面对某引水工程基础处理项目极端工期、复杂地质、超大工程量与超长物流距离的四重严峻挑战，项目团队以巨大的勇气和智慧，摒弃传统路径依赖，实施了一场以装备革新为引领的深刻技术与管理变革。通过构建“单臂液压凿岩台车钻孔、专用登高平台车辅助、移动式自动化灌浆台车注浆”的机械化协同施工体系，并攻克了超长距离浆液稳定输送关键技术，成功实现了施工效率的倍增、工程质量的卓越、安全生产的零事故以及综合成本的有效控制。本研究表明，在重大基础设施工程领域，面对前所未有的挑战时，以系统性创新思维，推动技术创新与管理创新的双轮驱动，是突破常规约束、实现多目标优化的根本途径。

参考文献

- [1] 汪晓峰, 周厚贵. 大型隧洞工程水泥灌浆技术现状与发展趋势 [J]. 岩土力学, 2019, 40(S1): 1-10.
- [2] 张可能, 刘志强. 复杂地质条件下超长隧洞施工关键技术研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [3] 陈政新, 等. 自动化灌浆记录与监控系统研究及应用 [J]. 水力发电, 2021, 47(5): 88-92.