

复杂地质条件下新奥法隧道“胶结—支护—掘进”一体化施工工艺优化

赵文修

湖北中科公路勘察设计院有限公司，湖北省孝感市，432100；

摘要：本文围绕新奥法隧道“胶结—支护—掘进”一体化施工模式的核心工艺与优化措施，结合四川紫坪铺水利枢纽工程导流洞的典型案例分析，系统介绍了超前注浆、初期支护、分步掘进及信息化监测在复杂地质条件下的应用与协同。通过多级注浆材料配比、锚索—锚杆组合支护、错层错马口分层开挖及智能化监测与仿真反馈，显著提高了施工安全性和效率，实现了大断面隧洞高质量快速贯通。

关键词：新奥法；超前注浆；复合支护；信息化监测

DOI：10.69979/3029-2727.25.08.015

引言

在岩溶溶洞、破碎断层带和弱胶结软岩等复杂地质条件下，传统隧道施工工艺面临安全风险高、效率低的问题。新奥法以“胶结—支护—掘进”三位一体的技术路线，通过超前加固、初期支护与分步掘进的有机配合，并结合实时监测与数值仿真反馈，实现了施工过程的动态优化与闭环管理。本文旨在从施工工艺与管理模式两个维度，探讨新奥法在大断面水利隧洞中的实践经验与工艺优化措施。

1 复杂地质条件下新奥法隧道工艺

1.1 胶结（注浆）技术

胶结技术是新奥法一体化施工的前沿防线，主要通过向围岩裂隙或松散体内充填高性能浆液，实现地层颗粒间的黏结增力和空隙填堵。在破碎断层带中，常用的超前管棚注浆采用 $\phi 127$ mm双液管棚，间距20 cm、长度8-10 m，造孔后先注射水泥—粉煤灰混合浆，再加压植入钢筋束，以形成钢管混凝土外壳，提高超前支撑体的抗弯和承载能力。对于岩溶溶洞或堆积体区，应用多级注浆手段：第一步“粗粒注浆”封堵大孔隙，第二步“细粒注浆”填充微小缝隙，第三步“化学注浆”在特定环境下使用聚合物或环氧树脂浆料，进一步提升围岩强度与抗渗性能。此外，在弱胶结软岩巷道中，可结合地层特性，调整注浆压力及配比：如将水灰比控制在0.6:1-0.8:1，通过多点排浆实现均匀渗透，从而提高围岩的整体承载力和自稳时间。

1.2 支护技术

支护技术在新奥法中承担围岩二次稳定的角色，要求在掘进后迅速形成承载体系，以限制围岩位移、控制变形。在破碎带和软弱夹层区，首推自钻式注浆锚杆，钻孔后直接注浆成孔，锚杆长度通常取8-10 m，梅花形或网格状布置，间距1.0 m左右，确保支护面与围岩紧密贴合。对于大断面隧洞，还应配合格栅钢拱架或钢管桩，在拱顶和拱脚部位提供刚性支撑，形成刚柔结合的“骨—筋”结构，既能抵抗瞬时冲击，又可兼顾弹性变形。在喷射混凝土方面，采用模喷方式加快施工速度，并结合速凝剂和增强纤维材料，提高衬砌的抗裂性和早期强度。针对弱胶结软岩，还可在支护顺序上进行优化：如先打2根锚索、再打8根锚杆的顺序，可使单循环支护用时由125 min缩短至70 min，效率提升78.57%。

1.3 掘进（掘支配合）技术

掘进技术强调与前两环节的无缝对接，以实现“掘进—监测—补强”闭环。分步掘进常采用“正台阶错马口”或“眼镜法”开挖模式，上半洞先行开挖2-3 m高的导洞，再逐层向下扩挖，每循环进尺控制在0.8-1.5 m，以减少围岩扰动范围。激光指向仪可提供高精度导向，保证掘进方向与设计轴线一致；在弱胶结软岩区域，推荐先截割小断面（宽度1/3），再攻略剩余2/3宽度，并采用自下而上的截割顺序，以缩短顶板悬空时间，防止冒顶。同时，将掘进与支护作业合理分工：一班三人操作综掘机，二人看皮带，二人备料；支护队伍以四臂钻车为主，6人同步作业，形成“掘进不停、支护不歇”的工作节奏，显著提升月进尺可达360 m以上。通过这种掘支配合的工艺，既保证了施工安全，又极大

地提高了掘进效率。

2 新奥法隧道“胶结—支护—掘进”一体化施工模式

2.1 超前胶结与精准加固

超前胶结作为首道防线，主要目的是对破碎带、溶洞、软弱岩层等薄弱部位进行加固封堵，减少地质扰动和地下水渗流。常用方法包括管棚注浆、深层分级注浆以及化学浆液注浆。通过先粗后细的多级注浆策略，先以水泥—粉煤灰混合浆填堵大孔隙，再以化学聚合物填充微裂隙，并结合高压注浆实现深层固结，可以显著提高围岩整体承载力和自稳时间；同时，通过注浆参数的在线调控，实现对围岩力学性能的精准提升，为后续支护创造良好的“刚柔”基础。

2.2 支护—掘进同步配合

在完成超前加固后，应立即开展初期支护，将自钻式锚杆、格栅钢拱架与模筑喷射混凝土按一定工序快速布局，形成“骨—筋—皮”支护体系。在掌子面掘进过程中，采用“错层错马口”或“眼镜法”分步开挖，每循环进尺控制在 1 m 以内，并在完成一次掘进后立即进行支护作业，实现“掘进不停、支护不歇”的同步节奏。通过制定合理的作业班组配备与设备调度方案，可将单循环支护时间从 125 min 缩减至 70 min，支护效率提升近 80%。

2.3 监测反馈与动态优化

信息化监测是新奥法模式的核心纽带，通过布设收敛变形、锚杆预张力、地表沉降等多种监测手段，实时获取围岩响应数据。将监测数据与数值仿真模型相结合，可动态评估支护结构与围岩的稳定状态，并针对超限变形及时调整开挖方案、支护参数或注浆策略，从而在保证安全的前提下，避免过度保守导致的资源浪费，实现真正意义上的“信息化施工”。

2.4 组织管理与团队协作

新奥法一体化施工不仅是技术集成，更依赖于严密的组织管理和多方协同机制。业主、监理、设计与施工单位需建立统一的决策流程，对监测、设计与施工数据实现共享；施工现场应设立快速响应小组，及时组织多学科专家对异常情况进行研判和处置；定期召开施工—监测—设计联席会，将最新反馈和优化措施固化到施工方案和施工规范中，真正做到“施工即设计、设计即施工”，确保复杂地质条件下的大断面隧洞建设既高效又

安全。

3 新奥法隧道“胶结—支护—掘进”一体化施工工艺优化措施

3.1 超前胶结工艺精细化与参数动态调整

在新奥法施工中，超前注浆不仅是对围岩的初步加固，更是后续支护和掘进的基石。优化措施首先应从注浆材料和配比上着手，将传统水泥—粉煤灰浆与化学聚合物浆结合，形成“粗—细—化学”多级注浆体系：粗浆快速填堵大孔隙，细浆渗透微裂隙，化学浆则在薄弱圈层形成高强度网格，从而提升注浆体整体承载力与抗渗性能。此外，引入智能化压注控制系统，可实时监测注浆压力、流量与回压等参数，将数据反馈至中央控制平台，通过预设阈值自动调整泵速与压力，确保浆液均匀渗透，避免过压致裂或堵塞死水区。

3.2 初期支护顺序与装备组合的高效优化

初期支护是围岩二次稳定的核心环节，其效率不仅直接影响掘进进度，还关系到施工安全与成本控制。针对弱胶结软岩及破碎带区，首先应开展地质剖面与岩体力学参数的系统试验与数值模拟，结合理论计算优化锚索与锚杆的布置顺序与类型配合。在此基础上，可先布设两根直径 25~32 mm 的高承载预应力锚索，通过张拉与注浆同步完成超前应力预张，形成“主支撑”体系；随后在相邻网格中安装八根自钻式注浆锚杆，利用高压浆液与双液注浆技术，实现对细小裂隙的填堵与加固，构成“辅支撑”网格。该“主—辅”组合支护方式能在最短时间内提供足够的承载力，将单循环支护时间从 125 min 缩减至 70 min，效率提升 78.6%。

此外，支护装备的合理组合也是提效关键。推荐使用四臂锚杆钻车配合轻型格栅钢拱架，前者可实现多功能一体钻进与注浆，无需更换设备即可完成钻孔、注浆、安装锚杆的全流程；后者以高强度低合金钢材制造，重量轻、可现场快速拼装，与速凝喷射混凝土及纤维增强材料协同使用，不仅快速构筑初期支护薄壳，还可有效控制裂缝扩展与收敛变形。

在支护参数设计上，通过有限元仿真优化桩距、埋深和注浆体预张力，实现支护面与围岩的应力匹配，并在施工中以高精度位移传感器与锚索张力计实时监测支护结构性能，根据监测曲线对注浆压力、浆液配比和锚杆预张力进行动态调整，最终实现资源利用率最大化与施工节奏最优化。

3.3 掘进策略与流程协同提升

掘进工艺的优化关键在于分步开挖与掘进-支护联动,以最小化围岩扰动并保持高效率。建议采用“先小后大、错层错马口”的分层分段开挖方案:首先在顶拱处截割宽度约为全宽1/3的小断面导洞,并从底部向上逐层向顶拱扩挖,随后再按照同样方式在底部开展扩挖直至全断面。该策略将顶板悬空时间缩至最短,降低了上部围岩的坍塌风险。

为了平衡掘进速度与施工安全,每次循环进尺建议严格控制在0.8 m~1.2 m之间,形成“小循环、高频次”的作业节奏。激光导向系统与全自动长喷履带导向装置能够在地质条件复杂的断层破碎带中保持掘进中心线的高精度,避免方向偏差;并可与地质雷达超前探测配合,提前识别板结层与溶洞位置,调整掘进参数及切削刀具。

在掘支协同方面,应完善班组人员与设备的同步调度方案:一班三名操作手集中负责综掘机作业,二名看护负责运输与通风,二名备料;支护队伍则以四臂钻车和喷锚车为主要装备,6名人员分角色实现支护孔位布设、注浆与喷射混凝土同步作业,形成“掘进不停、支护不歇”的连续作业模式。

3.4 信息化与智能化施工手段深化应用

信息化与智能化手段的深化应用是提升新奥法施工效能与安全性的必由之路。除常规的收敛变形、锚杆预张力及地表沉降监测外,应引入地质雷达超前预报技术,实现对方围岩结构的实时影像化探测,并结合BIM三维协同平台与数字孪生模型对施工全生命周期进行可视化管理。在项目实施过程中,将监测数据与数值仿真模型实时耦合,通过大数据与机器学习算法精准识别软弱区与水文地质异常,并基于云端研判结果快速下发优化指令,以调整注浆压力、支护顺序或掘进参数。

同时,现场可部署自动化注浆与支护机器人,配合5G通信网络实现远程监控与操控,减少人员在高风险区域的暴露时间,提高施工安全。除此之外,通过数字孪生平台,可以对整个施工过程进行虚拟仿真与风险预判,对可能出现的围岩变形、支护失效等情况进行“预见”预警,并提前制定应急预案。只有在“监测—仿真—预警—优化”闭环中不断循环迭代,才能较准确地描述围岩地质力学特性。

4 实际应用

以下以某隧洞工程为例,该导流洞位于岩溶发育区,洞身呈马蹄形,断面尺寸约13.7 m×14.6 m,掘进过程中穿越宽达80~100 m的F3断层破碎带和大量堆积体,

围岩极度软弱且含水量高,存在严重坍塌风险。

施工首先在开挖前采用 $\phi 127$ mm双液管棚进行超前注浆,布置在顶拱120°范围内,管棚间距20 cm、长度8~10 m,先施粗粒浆封堵大孔隙,再施细粒与化学浆提升围岩自稳时间,并插入 $\phi 25$ mm钢筋束增强抗弯性能,形成牢固的管棚混凝土外壳。开挖采用分层错马口(眼镜法)分块进行,先开挖上半洞导洞,再逐层扩挖,下步宽度控制在全宽1/3以内,每循环进尺0.8~1.5 m,顶板悬空时间大幅缩短,有效抑制顶板坍塌。

一次支护方面,洞内同步布设自钻式锚杆(长5~10 m、间距1 m),并安装格栅钢拱架,随即模筑喷射混凝土封护,后侧注浆回填消除空腔,迅速构筑“骨—筋—皮”复合支护体系,保障了围岩的二次稳定。全流程贯穿收敛变形、锚杆预张力、地表沉降等实时监测,结合数值仿真,动态调整注浆参数与支护顺序,最终实现导流洞安全成洞,月进尺达25 m(上半洞)与60 m(下半洞),取得显著经济与社会效益。

5 结论

随着信息化、智能化手段在隧道施工中的不断深化,新奥法“胶结—支护—掘进”一体化模式将更具前瞻性和适用性。通过精细化注浆参数控制、支护与掘进的高效协同、以及基于大数据与数字孪生的动态优化,能够在复杂地质条件下实现更加安全、高效、经济的隧洞成洞,为未来大型工程项目提供了可复制的技术范式和管理路径。

参考文献

- [1] 李景涛,张涛,安彦成,等.弱胶结软岩巷道掘进支护模式及工艺优化[J].能源技术与管理,2023,48(04):78-81+140.
- [2] 王庆铎,王博,计鹏举,等.弱胶结软岩巷道快速掘进及支护工艺优化[J].当代化工研究,2023,(08):149-151. DOI:10.20087/j.cnki.1672-8114.2023.08.050.
- [3] 张钟文.泥质胶结顶板巷道围岩控制技术研究[J].山西冶金,2023,46(03):196-198. DOI:10.16525/j.cnki.cn14-1167/tf.2023.03.078.
- [4] 白立军.富水弱胶结软岩巷道掘进顶板支护技术[J].价值工程,2022,41(33):67-69.
- [5] 张朋岗,王俊贤,鲁金贵,等.软岩岩层隧道掘进多种异常情况的综合处理措施[J].四川水力发电,2022,41(03):93-98.