

# 复杂地质条件下水利隧道施工支护技术优化研究

钟超文

岑溪市河长制工作站，广西岑溪，543200；

**摘要：**复杂地质条件制约水利隧道施工，其不确定性易致支护结构失稳、围岩变形等风险，影响工程安全与建设效率。本文以复杂地质水利隧道施工支护为研究对象，先明确支护技术优化内涵，再剖析当下施工支护存在的技术适配性不足、动态调控滞后、协同效能欠缺等问题，最后提出地质-支护协同匹配优化、动态智能调控系统构建、分阶段差异化支护技术优化、多工法协同支护体系完善等策略，后两项细化三级实施要点。研究成果可为复杂地质下水利隧道施工支护安全高效开展提供技术参考，提升支护结构可靠性与经济性。

**关键词：**复杂地质；水利隧道；施工支护；技术优化

DOI：10.69979/3060-8767.26.02.027

## 引言

水利隧道是水资源调配、防洪减灾工程的骨干建筑物，常穿行于断层破碎带、软弱夹层等地质构造之中。该类区域围岩力学性质差异大、应力分布不均，施工过程中地质条件动态变化，传统的支护技术不能保证工程的安全，容易造成工期延误、经济损失等问题。开展支护技术优化研究，对提高工程抗风险能力、保证施工安全、降低成本有重大意义。目前学界大多集中于单一技术的改进，缺少地质和支护体系间的相互考虑，优化策略的系统性不强。

## 1 复杂地质条件下水利隧道施工支护技术优化的内涵

复杂地质条件下水利隧道施工支护技术优化的核心内涵，是以地质动态演化特征为依据，坚持地质适配、动态调控、安全高效、经济合理为目标，从支护理念、技术体系、施工工艺、调控机制四个方面进行全方位的革新，使支护结构与围岩应力动态平衡。它不是单一技术局部改进，而是地质勘察、支护设计、施工实施、动态监测全流程的优化，强调用精准勘察数据做支撑，结合施工动态反馈形成闭环优化体系，兼顾支护承载性能和施工可操作性，达到安全、效率、效益三者的协同统一，提高工程抗风险能力、综合效益。

## 2 复杂地质条件下水利隧道施工支护存在的关键问题

### 2.1 支护与地质适配性不足

目前水利隧道施工支护设计大多依靠前期地质勘

察数据，使用标准化支护方案，未能有效地适应复杂地质条件多样性和动态性。穿越断层破碎带时，传统的喷锚支护不能很好地约束围岩的松散坍塌；在高应力硬岩区，刚性支护结构由于应力集中容易产生开裂；软弱夹层地段，柔性支护的承载能力稍显不足。同时部分工程没有进行针对性的地质专项勘察，对隐蔽的地质缺陷认识不足，造成支护技术选型错误，加大了支护结构与地质条件的适配矛盾，增加了支护失稳的风险。

### 2.2 动态监测的调控滞后

复杂地质条件下，隧道施工过程中围岩应力和变形是动态变化的，必须依靠实时监测数据来进行支护调控。但是目前大多数工程的监测系统存在很多缺陷：一是监测指标单一，多关注围岩表面变形，缺少对围岩内部应力、支护结构内力等核心指标的全面监测；二是监测设备精度不高，数据传输存在延迟，不能准确捕捉地质和支护体系的动态变化；三是调控机制被动，多在出现明显支护失效迹象之后才采取补救措施，缺少基于实时监测数据的预判性调控。该种“监测滞后-调控被动”的模式造成支护体系不能及时适应地质条件的变化，易引起围岩过度变形、支护结构破损等问题。

### 2.3 多工法协同效能不足

复杂地质条件下，单一支护工法不能满足工程安全要求，多采用喷锚、钢拱架、管棚、注浆加固等多工法组合支护。但是目前工程实践当中，多支护工法的运用存在“简单叠加”的情况，缺少系统的协同设计和施工组织。各支护工法的施工时序不合理，注浆加固未完成就进行喷锚施工，造成加固效果不能充分发挥；各支护

结构的受力协同性差，钢拱架与喷层连接不牢固、管棚与围岩的粘结强度不足，造成荷载分布不均，部分支护结构过早承担过多荷载而失效。

### 3 复杂地质条件下水利隧洞施工支护技术优化策略

#### 3.1 地质精准勘察适配优化

以支护技术同地质条件的适配性分析，以地质精准勘察为根基，创建起“勘察-设计-选型”的协同适配体系。首先优化地质勘察技术方案，用宏观勘察和微观探测相结合的组合勘察模式，宏观层面用高分辨率地质遥感、高精度地质雷达进行大范围地质分区和隐患初步排查，微观层面用钻孔取芯、声波测试、地质雷达近距离扫描等方式精确探测隐蔽地质缺陷的分布范围和规模，建立包含地质参数、应力分布的三维地质信息模型，实现地质条件的可视化、精准化表征。其次，根据三维地质模型，实施支护技术差异化选择，对断层破碎带，使用管棚注浆加固+钢拱架+喷锚的组合支护技术，通过注浆填充裂隙增强围岩的整体性；对高应力硬岩区，使用柔性喷层+预应力锚杆的支护技术，用柔性喷层的变形协调性和预应力锚杆的主动承载性来释放围岩应力；对软弱夹层，使用注浆加固+大间距钢拱架+钢筋网喷锚的支护技术，提高支护结构的承载能力和抗变形能力。最后创建支护参数动态优化数据库，将不同复杂地质区域的工程案例数据、现场试验数据、数值模拟结果相结合，对不同地质分段的支护强度、间距、施工时序等参数实施迭代优化，保证支护技术同地质条件精准匹配，削减支护失稳风险。

#### 3.2 实时监测智能调控构建

以动态监测和调控机制滞后的问题分析，创建起“全指标监测-数据智能分析-精准调控”的动态智能调控系统。一是完善监测指标体系，建立围岩表面变形、内部应力、支护结构内力、环境参数（温度、湿度）的全维度监测网络，在断层破碎带、软弱夹层等重点风险区增加监测点位，使用高精度光纤传感、无线传感、智能传感节点等先进的监测设备，实现监测数据实时采集、无线传输和云端存储，保证数据传输的时效性、完整性。二是搭建智能数据分析平台，集成大数据挖掘、机器学习（LSTM 神经网络等）技术，根据历史监测数据和地质演化规律，建立地质条件与支护体系动态演化的预测

模型，用实时监测数据与预测模型的对比分析，准确研判支护体系的稳定性状况，提前发现潜在风险隐患并发出预警信号。三是建立主动调控机制，根据智能分析结果和预警等级来制定分级调控方案，在监测指标接近预警阈值的时候自动发出调控指令，通过改变支护参数、优化施工时序、增加支护结构等措施来实现支护体系的动态适配。

#### 3.3 分阶段差异化支护优化

##### 3.3.1 施工准备阶段预设优化

施工准备阶段属于支护技术优化的前置环节，主要依据精准地质勘察数据开展支护预设优化，为后续施工支护提供科学依据。首先，根据三维地质信息模型，采用风险分级评估方法（模糊综合评价法等）划分出高、中、低风险区域，确定出高、中、低风险区域的边界范围和地质特征，对各个等级区域分别制定出不同的支护预设方案，详细地说明各个区域的支护工法选型、核心参数（喷层厚度、锚杆长度等）、材料规格和施工重难点控制要求。第二阶段对支护材料的适应性优化，按照地质条件下的力学要求和环境特点研发、选用高性能支护材料。高腐蚀地质环境用耐腐型纤维增强喷混凝土和环氧涂层锚杆，高应力区域用高强度预应力中空注浆锚杆，软弱围岩用高韧性喷混凝土，提高支护材料与地质环境的适配性。最后利用三维数值模拟软件（FLAC3D）以及室内相似模型试验，对预设的支护方案进行可行性、安全性验证，模拟不同地质条件下支护结构的受力、变形情况，分析极端地质工况下支护的响应，根据模拟结果迭代优化支护参数，保证预设方案可以应对施工地质风险。

##### 3.3.2 施工过程动态支护优化

施工期间地质条件的动态变化是决定支护效果的重要因素，需要根据施工实时反馈信息来开展支护动态优化，保证支护体系一直适应地质演化状态。一是创建施工地质编录及实时反馈体系，安排专业的地质人员跟随隧道开挖施工的全过程，利用数字化编录的方式，随时记载围岩揭露状况，对比分析实际地质条件与前期勘察数据的差别，及时对三维地质模型进行修正，给支护改良给予最新的地质依据。第二，对地质条件突变区域（如突遇断层、大范围软弱夹层），实施应急支护优化，事先制定多套应急支护方案，配备应急支护设备和专用材料，一旦发现不良地质，立即启动应急响应，采用临

时钢拱架快速支护、超前小导管注浆加固等应急措施控制围岩变形，待围岩稳定后，根据修正后的地质数据优化永久支护方案。三是改进支护施工工艺，根据不同的支护工法技术特点和地质适配要求，改进施工工艺参数，喷锚施工采用湿喷工艺，优化喷射压力和角度，提高喷层密实度和粘结强度；钢拱架安装采用激光定位技术，保证安装精度和垂直度；注浆施工采用分段注浆、压力控制注浆工艺，准确控制注浆量和注浆压力，提高加固效果。

### 3.4 多工法协同体系完善

#### 3.4.1 协同支护体系系统设计

打破多支护工法“简单叠加”的传统模式，根据地质条件和工程安全需求，对协同支护体系进行系统设计，使各个工法的功能相互补充、受力相互协调。首先确定各种支护工法的功能定位和协同逻辑，构建超前加固、初期支护、二次支护递进式的协同支护体系：超前支护以管棚、超前小导管注浆加固为主，提前约束前方围岩变形，为开挖创造安全环境；初期支护以喷锚、钢拱架联合支护为主，快速形成承载结构，承担施工期主要围岩荷载；二次支护以模筑混凝土、钢筋混凝土为主，进一步提高支护体系的长期稳定性，保证隧道运营安全。其次，优化各支护工法施工时序及参数匹配关系，用FLAC3D、MidasGTS等数值模拟软件计算各支护结构受力时序特征及承载比例，确定合理的施工间隔时间，超前注浆加固完成后养护72h以上，保证注浆体强度达标后再进行初期支护施工，精准匹配各工法参数，根据围岩破碎程度优化喷层厚度与钢拱架间距比值，根据围岩应力大小确定锚杆长度与预应力值，保证各支护结构协同受力、荷载均匀分布。最后建立协同支护设计验证体系，通过现场载荷试验、原型结构测试、室内模型试验等方式对协同支护体系的承载能力、抗变形能力、稳定性进行全方位的验证，根据验证问题对设计方案进行优化，保证其科学可靠。

#### 3.4.2 协同支护施工精细管控

加强多工法协同支护施工的精细化控制，从组织、设备、质量三个方面建立控制体系，全面保证协同支护体系的实施效果。一是制定协同施工组织方案，明确开挖、注浆、喷锚、钢拱架安装等各施工班组的职责分工和协作流程，建立跨班组每日协同沟通会议制度，及时协调解决施工衔接过程中出现的问题，保证各支护工法

施工衔接顺畅、有序推进，防止施工干扰和工序脱节。二是优化施工设备的配置与协同控制，使用智能化、一体化施工设备，比如全自动喷锚机器人、钢拱架安装台车、精准注浆设备等来提高施工精度和效率，利用物联网技术实现多设备的同步作业和精准配合，如喷锚机器人与钢拱架安装台车的轨迹协同控制，保证喷层与钢拱架贴合。三是创建全流程协同支护质量控制体系，制订各个支护工法的质量验收标准和检测流程，采取超声波无损检测、钻孔取芯检测、锚杆拉拔试验等方式，对支护结构的施工质量实施全面、动态的检测，重点加强对各支护结构连接部位（钢拱架与喷层粘结处、锚杆与围岩锚固端）的质量控制，设置关键质量控制点，严格把控施工过程质量。

## 4 结论

复杂地质条件下水利隧洞施工支护技术优化，是保证工程安全高效建设的关键举措，核心就是创建起以地质动态演化为依据的全流程闭环优化体系。目前支护存在技术适配性差、动态调控滞后、协同效能低等问题，影响工程的安全和效益。本文提出的地质-支护协同适配、动态智能调控、分阶段差异化支护优化、多工法协同体系完善等策略，可以提高支护的适配性、调控的精准性、体系的整体性，分阶段、多工法细化优化使策略更加具有可操作性。

## 参考文献

- [1] 郭领兵. 水利工程隧洞喷锚支护及衬砌加固施工技术[J]. 科学技术创新, 2024, (23): 183-186.
- [2] 代龙. 水工隧洞衬砌与喷锚支护加固设计及施工分析[J]. 江西建材, 2024, (09): 162-164.
- [3] 陆焱刚. 水利枢纽导流隧洞进口段锚喷联合支护施工技术[J]. 水利技术监督, 2024, (08): 259-262.
- [4] 李富强, 康波. 水利水电工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工技术研究[J]. 中国高新科技, 2024, (14): 139-141.
- [5] 张生武. 水利工程隧洞衬砌及喷锚支护加固施工[J]. 科学技术创新, 2024, (07): 161-164.

作者简介：钟超文（1981—），男，汉族，广西梧州岑溪市人，大专学历，助理工程师，研究方向：水利水电施工技术。