

水利隧洞 TBM 掘进中国岩变形控制与支护优化研究

杨利军 朱秀

四川二滩国际工程咨询有限责任公司 四川 成都 611130

【摘要】：水利隧洞 TBM 掘进过程中，围岩变形控制与支护结构优化对施工安全与稳定具有重要影响。围绕围岩力学特性、地质条件差异及掘进参数对围岩响应的影响进行分析，并结合监测预警与支护体系优化措施，探讨适用于 TBM 施工条件的变形控制方法。通过工程实践分析表明，合理调控掘进参数、完善监测体系并优化支护结构组合，可有效降低围岩变形程度，提升隧洞整体稳定性与施工效率。

【关键词】：水利隧洞；TBM 掘进；围岩变形；支护优化；施工安全

DOI:10.12417/2705-0998.26.05.015

引言

随着水利工程的不断发展，水利隧洞的施工规模逐渐增大，隧道掘进机（TBM）在水利隧洞的应用也日益广泛。TBM 作为一种高效的隧道掘进工具，在水利隧洞工程中具有显著的优越性。围岩变形的控制和支护系统的优化，成为了影响施工进度与质量的重要因素。在复杂的地质条件下，围岩的变形往往给隧洞施工带来很大挑战。如何针对不同的围岩类型进行有效的支护设计，保证隧道掘进过程中的稳定性，已成为研究的关键课题。

1 围岩变形分析及影响因素

1.1 围岩力学特性分析

围岩的力学特性是影响隧道施工稳定性的核心因素之一，尤其在水利隧洞的 TBM 掘进过程中，围岩的物理和力学性质直接决定了隧道的变形模式及支护需求。岩体的强度、刚度、粘结力以及摩擦角等力学特性在掘进过程中不断变化，特别是在复杂地质条件下，这些变化对 TBM 掘进效率与隧道稳定性有着重要影响。围岩的抗压强度和抗拉强度低时，可能导致掘进机的推进速度减慢，甚至发生局部崩塌。而围岩的粘结力强且结构较为紧密时，通常能有效减缓变形的发生，保障隧道结构的安全。准确评估围岩的力学特性，对于选择合适的支护形式和控制变形具有决定性作用。对围岩力学特性的深入分析有助于预测隧道的变形行为，还能为支护设计提供科学依据。

不同岩层和地质条件下，围岩的力学特性呈现出显著差异，这些差异在 TBM 掘进中显现得尤为突出。对于软弱围岩，通常需要采取强化支护措施，如采用锚杆加固或喷射混凝土支护，而硬岩层则可能要求更高的掘进机驱动力与专门的刀具设计。对围岩力学特性的全面评估，可以通过数值模拟和地质力学试验，深入分析不同力学参数对围岩稳定性及施工效率的影响。随着掘进的深入，围岩的力学特性可能发生变化，持续的力学监测和数据反馈，对于及时调整施工方案和支护设计至关重要。

1.2 地质条件对围岩变形的影响

地质条件在隧道掘进过程中扮演着决定性的角色，尤其对于水利隧洞的 TBM 施工，复杂的地质环境会显著影响围岩的变形和支护系统的选择。地质条件的变化涉及岩性、裂隙发育、地下水等多个方面^[1]。在硬岩区，裂隙的存在可能导致岩体在受力过程中产生不均匀变形，进而影响掘进机的推进效率及隧道的稳定性。而在软弱围岩或高水位区域，地下水的渗透性则可能导致围岩的软化，增加了围岩的变形量，并且极易造成支护系统的破坏。地质条件中的不均匀性，特别是岩层的交替、变形的复杂性，会增加支护结构设计的难度，需要结合现场实时数据进行动态调整。

不同地质条件对围岩变形的影响也在随时间的推移中展现出不同的特征。特别是在复杂的地质条件下，围岩的变形不仅取决于岩体的强度，还受到外部荷载和施工方式的交互影响。在软弱围岩中，地下水位的波动和气候变化都可能加剧围岩的软化，进而导致支护结构失效或变形过大。不同地质条件下的掘进方式，也决定了围岩变形的具体特征。在不稳定的地质条件下，TBM 掘进机的推进力和掘进速度需要做出调整，以避免对围岩造成过大的扰动。

1.3 围岩变形的监测与预警

围岩变形监测是水利隧洞 TBM 掘进过程中掌握围岩响应特征、校核支护参数和保障施工安全的重要手段。结合工程实际，应建立以拱顶下沉、周边收敛、地表沉降、围岩深部位移和初期支护内力为核心的监测体系，配合多点位移计、收敛计、锚杆测力计、钢拱架应力计及孔隙水压力计开展连续观测。TBM 通过断层破碎带、软弱夹层和高地应力段时，围岩应力重分布更为明显，局部塑性区扩展速度加快，监测数据往往呈现突增、波动加剧和时效变形延长等特征。此时需要把掘进参数、出渣状态、刀盘扭矩和推进力与监测结果进行联动分析，准确识别围岩失稳征兆，为支护时机和支护强度调整提供可靠依据。

预警机制的关键在于把监测数据转化为可执行的施工控

制指令,避免围岩变形由可控状态发展为结构失稳。围绕水利隧洞 TBM 施工特点,可采用分级预警模式,对位移速率、累计变形量、支护受力增长幅度及地下水异常变化设置控制阈值,形成“监测采集—数据判读—风险分级—措施响应”的闭环管理流程。当收敛速率持续增大或拱顶沉降超出允许范围时,应及时采取缩短支护闭合时间、加密系统锚杆、增设钢拱架、提高喷射混凝土厚度和优化同步注浆参数等措施,控制围岩松动圈进一步扩展。

2 支护体系设计与优化

2.1 传统支护方式的局限性

传统支护方式在一般隧洞施工中具有较强适用性,但在水利隧洞 TBM 掘进条件下,其适配程度往往不足。TBM 施工强调连续推进、快速成洞和设备系统协同运行,而以单一喷射混凝土、普通锚杆或被动型钢支护为主的传统方式,常常难以及时匹配围岩应力释放节奏。特别是在断层破碎带、软弱夹层及高地应力区段,围岩变形具有突发性和时效性,若支护参数仍沿用固定模式,容易出现初期支护刚度不足、封闭环滞后、局部掉块和拱部收敛偏大等情况。这类支护方式更多依赖经验判定,缺乏对 TBM 掘进扰动特征和围岩动态响应的针对性控制,难以满足复杂地层中的稳定要求。

从施工组织和支护受力机理分析,传统支护方式还存在信息反馈滞后、结构协同能力偏弱等问题。部分工程中,支护布置未能与掘进参数、刀盘推力、注浆效果及围岩松弛范围形成联动,导致支护虽已实施,却未真正发挥控制变形和分散荷载的作用。尤其在富水围岩和节理裂隙发育地段,单纯依靠常规喷锚支护难以有效抑制围岩软化与渗流耦合作用,容易引起支护开裂、锚固失效和局部失稳。对于长距离水利隧洞而言,若长期采用刚性单一、调整缓慢的支护模式,不仅增加后期修复处理量,也会影响 TBM 掘进效率和施工安全管理水平。

2.2 支护方案的优化策略

支护方案优化的重点在于提升支护结构与围岩条件之间的匹配度,使支护体系能够适应 TBM 掘进过程中的动态荷载变化和地层差异。针对水利隧洞施工特点,应根据围岩分级、结构面组合、地下水发育情况及地应力分布特征,建立分区分级支护体系,避免采用统一参数覆盖全部区段^[2]。对完整性较好的围岩,可采用系统锚杆结合薄层喷射混凝土的轻型支护模式,以减少材料消耗和施工干扰;对破碎岩体、高变形围岩及浅埋偏压段,则应配置钢拱架、超前小导管、加密锚杆及高性能喷射混凝土等复合支护手段,增强支护的承载能力和变形协调能力。

优化策略还应体现“动态调整、信息驱动、施工协同”的思路,把监测结果纳入支护决策过程。围绕 TBM 施工现场,可将围岩收敛值、拱顶沉降、支护受力、渗压变化以及刀盘参

数变化进行综合判读,及时修正锚杆长度、间距、喷层厚度和钢拱架型号,实现支护参数的滚动优化。对于不良地质段,可提前引入超前地质预报成果,预留支护增强方案和应急加固措施,降低突发失稳风险。支护优化并不只是增加材料投入,而是通过支护时机控制、结构组合优化和施工节奏调整,形成“短进尺、快封闭、强约束”的控制路径,在保证安全的同时提高 TBM 连续掘进能力。

2.3 支护设计中的关键技术与措施

支护设计要真正发挥控制围岩变形的作用,关键在于把地质条件、围岩等级和 TBM 施工工况统一到设计逻辑中。设计阶段需要重点分析围岩自稳时间、塑性区分布、松动圈厚度及地下水活动特征,合理确定初期支护刚度、封闭断面形式和支护构件组合方式。锚杆设计不能只停留在常规长度和排距控制上,还应考虑锚固段穿越破碎带后的稳定层厚度,保证锚固体系具备有效传力能力。喷射混凝土参数则要结合回弹率、早期强度和抗渗性能进行综合选取,确保其在围岩应力释放阶段能够尽快形成承载壳体。

施工措施的落实程度,直接决定支护设计能否转化为实际控制效果。水利隧洞 TBM 掘进中,应重视超前支护、同步注浆、快速封闭和监测反馈等环节的配合。遇到富水断层、碎裂岩体和挤压性围岩时,可采用超前探孔、超前注浆和局部管棚加固,降低掌子面前方围岩扰动敏感性;在管片或初期支护成型后,应及时实施回填注浆,减小衬砌背后空隙,改善围岩与支护结构的接触状态。

3 TBM 掘进过程中围岩变形的控制方法

3.1 掘进机操作与围岩变形的关系

TBM 掘进参数的设定直接影响围岩扰动范围和变形发展程度,推进力、刀盘转速、贯入度、扭矩以及同步支护节奏之间存在明显耦合关系。推进力偏大时,掌子面前方围岩承受附加扰动,易在软弱破碎带产生剪切松弛和局部掉块;刀盘转速过高时,刀具对节理裂隙面的切削频率增大,围岩完整性下降,拱肩和边墙部位更容易出现收敛增量偏大的现象。若掘进速度与出渣能力不匹配,仓内土压或渣土排出效率波动,也会改变开挖面受力状态,导致围岩应力重分布加剧。对水利隧洞而言,地层变化快、施工连续性强,掘进操作若缺乏针对性调控,围岩变形往往会由局部异常逐步演变为系统性失稳风险。

围岩变形并非单独由地质条件决定,设备操作方式同样会改变围岩的响应特征。穿越高地应力区段时,若掘进循环时间过长,暴露围岩持续处于卸荷状态,塑性区扩展速度会明显增加;管片拼装或初期支护闭合滞后,则会削弱围岩约束条件,使拱顶沉降和周边收敛持续累积。现场施工中常将刀盘电流、推进油缸压力、掘进姿态偏差和地质编录结果联合分析,据此判断围岩是否进入敏感变形阶段,并同步修正掘进模式。

3.2 围岩变形控制的优化措施

围岩变形控制的关键在于减少开挖扰动、提高支护闭合效率并增强支护结构的适应能力。针对水利隧洞 TBM 施工特点,需根据围岩级别和不良地质分布,对掘进参数实行分区控制,在完整硬岩段保持稳定贯入,在破碎软弱段适当降低推进速度和刀盘转速,减小瞬时卸荷幅度^[3]。进入断层破碎带、富水裂隙带和挤压性围岩区段时,可配合超前地质预报结果,提前实施超前注浆、局部加固和预支护措施,缩小围岩松动圈范围。支护时机应尽量前移,通过喷射混凝土、系统锚杆、钢拱架与回填注浆的协同作用,尽快形成封闭承载体系,避免围岩在长时间暴露中发生持续蠕变和结构性损伤。

优化措施的效果还依赖监测反馈与施工调整的联动机制。施工现场应建立以拱顶下沉、周边收敛、深部位移、支护内力及渗压变化为核心的监测网络,对关键断面实行动态跟踪,并将监测结果实时反馈至掘进控制系统和支护设计环节。当位移速率持续升高或支护受力接近控制值时,应及时采取缩短循环进尺、加密锚杆布置、增厚喷层、增强锁脚支护和优化同步注浆压力等措施,阻断变形扩展路径。

3.3 工程实例分析与效果评估

某水利隧洞采用 TBM 施工,洞段埋深较大,围岩以断层破碎岩体和节理裂隙发育的中硬岩为主,局部伴有渗水和高地应力现象,开挖后曾出现拱顶沉降偏快、边墙收敛增大和局部喷层开裂等情况。施工单位结合地质预报与监测结果,对掘进与支护参数进行了系统调整,控制刀盘转速和推进力波动幅

度,缩短单循环进尺,并在不良地质段增设超前注浆和加强型钢拱架支护。对锚杆长度、排距和喷射混凝土厚度进行了分级优化,配合回填注浆改善支护背后空隙状态。调整后,监测断面的位移增长趋势明显减缓,围岩松弛范围得到控制,TBM 施工连续性和支护稳定性均有改善。

从效果评估看,优化后的控制体系在安全性、经济性和施工适应性方面表现出较强优势。监测数据显示,重点区段的拱顶沉降和周边收敛峰值较调整前明显下降,支护内力分布趋于均匀,局部失稳处置次数显著减少,说明围岩变形已由被动处理转向主动调控。施工记录表明,掘进参数稳定后刀具异常磨损有所减轻,停机处理频率下降,支护材料投入更加集中于高风险区段,避免了全断面过度加固带来的资源浪费。该实例表明,水利隧洞 TBM 掘进中的围岩控制不能脱离现场工况单独讨论,只有把设备操作、支护设计、监测预警和地质处置统一起来,才能实现围岩变形可控、支护受力合理和施工效率同步提升。

4 结语

本文围绕水利隧洞 TBM 掘进过程中围岩变形控制与支护优化问题进行系统分析,从围岩力学特性、地质条件影响、监测预警、支护体系优化以及掘进参数控制等方面展开探讨,并结合工程实践提出针对性的控制措施。分析结果表明,合理调整掘进参数、完善监测体系并优化支护结构组合,可有效降低围岩变形程度,提高隧洞结构稳定性与施工安全水平,为水利隧洞 TBM 施工管理提供可参考的技术思路。

参考文献:

- [1] 翁海洪.初期支护参数变化下输水隧洞受力响应研究[J].水利科技与经济,2025,31(12):120-125.
- [2] 李东强,王俊,赵云龙,等.引水隧洞软岩变形机理及支护对策试验研究[J].科技通报,2025,41(12):85-91+98.
- [3] 杨锋.复杂地质条件下 TBM 硬岩掘进机安全施工技术[J].建井技术,2025,46(05):34-40.