

水工隧洞 TBM 掘进中突发破碎带应急支护对策探讨

李兴虎

云南省水利水电勘测设计院有限公司 云南 昆明 650051

【摘要】：水工隧洞 TBM 掘进过程中，突发破碎带易引发围岩失稳、涌水涌砂及设备卡滞等风险，直接影响施工安全与进度控制。围绕破碎带突发条件下围岩力学特性变化与 TBM 施工扰动耦合作用机理，分析典型失稳模式及变形演化特征，提出以超前探测为前提、分级响应为核心、综合支护为手段的应急处置体系。通过优化支护时序与结构组合，强化注浆加固与快速封闭措施，实现对破碎围岩变形的有效控制与风险源隔离。实践表明，构建系统化应急支护对策，可显著提升破碎带段施工稳定性与掘进连续性，为复杂地质条件下水工隧洞 TBM 安全施工提供技术支撑。

【关键词】：水工隧洞；TBM 掘进；破碎带；应急支护；围岩稳定

DOI:10.12417/2811-0528.26.08.084

水工隧洞穿越复杂地层时，破碎带的突然出现往往打破原有受力平衡，使围岩结构迅速劣化。TBM 施工依赖连续掘进与成型支护，一旦进入破碎带区段，围岩松散、节理发育及地下水活动增强等因素叠加，极易诱发塌落、变形失控及设备受阻等问题。工程实践中，传统常规支护措施难以及时适应突发地质变化，施工风险呈现集中与放大趋势。如何在短时间内完成风险判识、支护决策与结构加固，成为保障施工连续性与结构安全的关键环节。围绕突发破碎带情境下的支护组织与技术组合展开系统分析，有助于提升复杂地质条件下 TBM 施工的稳定性和可控性。

1 突发破碎带对 TBM 掘进稳定性的影响机制

1.1 破碎带围岩结构特征与力学劣化

破碎带多由强构造挤压或剪切作用形成，岩体节理裂隙密集发育，块体结构松散，完整性系数明显降低，岩体呈碎裂状或碎块状构造特征。围岩黏结力与内摩擦角大幅衰减，抗压强度与变形模量显著下降，原有自承载结构被破坏，围岩稳定性主要依赖残余强度维持。地下水沿裂隙网络渗流，软化岩石基质，导致软弱夹层与破碎区段强度进一步劣化，局部出现泥化现象。在高地应力背景下，破碎岩体受力后产生剪切滑移与块体转动，形成塑性区迅速扩展的趋势。该类围岩对外界扰动极为敏感，受开挖卸荷影响后应力重分布明显，极易诱发松弛区扩大和拱顶掉块现象，稳定性呈现突变特征。

1.2 TBM 扰动作用下变形扩展规律

TBM 掘进过程中，刀盘切削与推进行为对掌子面及周边围岩产生持续扰动，破碎带内岩体在开挖卸荷与机械振动共同作用下应力迅速释放。围岩由三向受压状态转为双向或单向受压状态，径向变形增大，塑性区向外扩展。推进力与扭矩波动加剧时，破碎岩块产生重新排列与滑移，局部形成剪切带，拱

顶及侧墙位移速率明显提升^[1]。若地下水压力较高，孔隙水压力叠加削弱有效应力，围岩承载能力进一步下降，变形呈加速趋势。同步支护未及时闭合时，围岩暴露时间延长，变形累积效应增强，易出现收敛变形超限与支护受力不均现象，进而影响管片拼装质量与结构整体受力状态。

1.3 典型失稳形式与风险演化路径

突发破碎带条件下，掌子面稳定性显著下降，易出现坍塌、掉块及塌方等破坏形式。围岩结构松散时，拱顶岩块在自重及扰动作用下脱落，形成空洞区，进一步诱发上覆岩体塌落。侧墙剪切滑移会导致隧洞断面收缩，支护结构受力集中，产生开裂或错台。地下水发育区域可能伴随涌水涌砂现象，冲刷细颗粒物，形成空腔与流失通道，稳定条件持续恶化。风险通常由局部松动演变为整体失稳，经历裂隙扩展、块体脱落、塑性区贯通等阶段，若未及时采取加固措施，失稳范围沿隧洞轴线方向延伸，造成掘进受阻及设备受限，施工安全性显著降低。

2 破碎带快速识别与风险分级方法

2.1 超前地质预报技术集成

水工隧洞 TBM 掘进进入构造复杂区段时，构建多手段耦合的超前地质预报体系，是实现破碎带快速识别的技术前提。依托 TBM 设备平台，可布设地质雷达、超前水平钻探、地震波反射法及瞬变电磁探测等多种探测方式，通过不同物理场参数响应特征识别围岩结构异常。地质雷达可对前方数十米范围内的介质电性差异进行成像分析，反映裂隙发育程度与含水状况；超前钻探则通过取芯及钻进参数变化，直接判定岩体完整性与软弱夹层分布；地震波法利用波速衰减与反射界面特征判断破碎带规模及空间形态。各类数据经综合解译后，形成围岩质量指数分布图与异常区段定位结果。结合 TBM 推进力、刀盘扭矩、贯入度等实时施工参数，可建立地质异常与设备运行

状态之间的对应关系,实现对突发破碎带的前置识别与空间范围判定,为后续支护决策提供可靠依据。

2.2 围岩变形与参数动态判识

破碎带条件下围岩稳定性变化呈现时间敏感特征,依赖单一静态指标难以准确评估风险等级。施工过程中需建立以变形监测与施工参数反馈为核心的动态判识机制^[2]。通过布设收敛计、锚杆应力计、围岩压力盒及孔隙水压力传感器,获取围岩径向位移、支护受力及水压力变化曲线,分析变形速率与应力重分布特征。当围岩位移增长率出现突增,或支护内力超过设计警戒值时,表明塑性区扩展加快。与此同时,TBM推进系统参数波动可作为辅助判据,贯入度异常降低、扭矩与推力剧烈变化,往往反映前方岩体强度与结构条件发生突变。通过建立多参数耦合判识模型,对围岩稳定状态进行实时评估,实现由经验判断向数据驱动转变,使风险识别更加精准与及时。

2.3 突发风险分级与响应标准

针对突发破碎带情境,有必要构建分级明确、指标量化的风险响应体系。依据围岩完整性指标、变形速率阈值、支护受力水平及地下水涌出量等参数,划分为可控级、警戒级与危急级等不同风险等级。可控级状态下围岩变形处于设计允许范围,采取常规加强支护即可维持稳定;警戒级阶段围岩变形速率明显加快,需调整掘进参数并实施超前注浆或临时加固措施;危急级状态表现为掌子面失稳征兆显著或支护结构受力异常,需立即停止掘进,实施全断面加固与封闭控制。分级标准应结合工程埋深、地应力水平及水文地质条件进行修正,形成具有针对性的控制阈值。通过风险等级与处置措施的对应关系,实现决策流程标准化,确保应急支护措施启动及时、执行有序。

3 应急支护体系构建思路

3.1 分阶段支护时序优化

突发破碎带条件下,围岩应力释放速率快、结构自稳能力弱,支护实施时序直接影响稳定控制效果。围绕“短暴露、快封闭、强约束”的原则,应将支护过程划分为临时控制阶段、强化加固阶段与结构闭合阶段。掌子面开挖完成后,应在最短循环时间内完成初期封闭措施,通过钢拱架、喷射混凝土及系统锚杆形成初始承载环,限制围岩径向位移发展。在围岩变形速率仍处于高值区间时,同步布设加密锚杆或管棚支护,缩短支护滞后时间,避免塑性区持续外扩。待围岩变形趋于收敛后,及时实施二次衬砌或管片拼装闭合,形成完整受力体系。支护时序的优化需结合监测数据与TBM掘进节奏进行动态调整,确保支护刚度与围岩变形过程相匹配,实现变形可控条件下的稳定过渡。

3.2 刚柔结合的结构组合模式

破碎带围岩呈低强度、高变形特征,单一高刚度支护结构易产生应力集中,诱发局部破坏。构建刚柔结合的结构体系,有助于在控制变形的同时释放部分围岩应力。柔性支护以系统锚杆、钢筋网及高延性喷射混凝土为主,依托围岩变形协调能力,形成初期约束结构;刚性支护则采用型钢拱架、钢管拱及管片衬砌等构件,提高整体承载能力与抗压强度^[3]。两类结构通过合理布置与参数匹配,形成多层次受力体系,使围岩与支护共同承担荷载。针对高地应力区段,可在拱顶与侧墙关键部位布设加密钢拱架,提高局部刚度;在变形集中区采用可变形连接节点,缓解应力峰值。结构组合设计需基于围岩分级与变形预测结果,兼顾安全储备与施工效率,实现稳定控制与掘进连续性的协调。

3.3 注浆加固与封闭控制技术

破碎带岩体裂隙发育、孔隙率高,注浆加固成为提高整体性与抗渗能力的重要手段。通过超前小导管或径向注浆孔向围岩注入水泥浆液或化学浆液,可填充裂隙空间,增强岩体黏结强度与抗剪能力。浆液扩散范围与渗透深度需依据岩体渗透系数及裂隙连通性进行控制,采用分段注浆与压力分级控制方式,避免浆液流失或地层扰动扩大。对于含水丰富区段,应选用凝结时间可调的浆材,提高止水效果并形成加固帷幕。封闭控制技术侧重于掌子面与开挖轮廓的及时密封,通过喷射混凝土封闭裸露面、设置止水环及临时封堵结构,减少地下水及松散体进入开挖空间。注浆与封闭措施协同实施,可在短时间内改善破碎围岩的整体稳定状态,为后续支护结构提供可靠承载基础。

4 破碎带段施工组织与协同控制

(1) 掘进参数调整策略:破碎带区段岩体完整性差、抗剪强度低,TBM掘进参数若保持常规模式,易诱发掌子面失稳与超挖现象。针对围岩软弱与结构松散特征,应对推进力、刀盘转速、贯入度及扭矩进行系统性优化。推进力控制在满足切削需求的合理区间内,避免过大推力导致岩体挤压破碎范围扩大;刀盘转速适度降低,以减弱振动幅度与扰动频率,减少对松散块体的冲击。贯入度应结合岩体强度指标进行调整,维持均衡切削状态,防止局部受力集中。对于含水破碎带,可适当控制开挖面压力,稳定掌子面土体结构。掘进过程中对参数变化趋势进行连续记录,当出现推力波动异常或扭矩突增时,及时降低掘进速度并开展前方探查。参数调控需与围岩等级及支护能力相匹配,在确保掌子面稳定的前提下维持合理掘进效率。

(2) 支护与掘进协同作业流程:破碎带段施工组织应强

化掘进与支护工序之间的衔接效率,缩短围岩暴露时间,形成闭合受力体系。开挖完成后立即开展初期封闭措施,喷射混凝土厚度与强度等级根据围岩稳定性进行加密配置,钢拱架安装与锚杆施工同步展开^[4]。TBM掘进节奏需与支护施工能力保持协调,避免出现掘进超前而支护滞后的情况。针对局部失稳风险区段,可采用短进尺循环方式,分段推进、分段加固,控制变形扩展范围。管片拼装或二次衬砌施工应在围岩变形趋稳区间内完成,减少结构受力不均现象。施工组织中设置专门的应急作业小组,负责支护材料调配与设备保障,提高处置效率。通过明确工序衔接时间节点与作业标准,实现掘进与支护协同推进,降低突发风险对整体施工节奏的影响。

(3) 监测反馈与动态修正机制:破碎带施工过程中,围岩与支护体系处于持续调整状态,依托信息化监测手段建立动态修正机制具有重要现实价值。监测内容涵盖围岩收敛位移、拱顶沉降、支护内力、地表沉降及地下水压力等关键指标,通过自动化采集系统实现数据实时传输与集中分析。对监测曲线进行趋势判读,当位移增长率或支护应力接近预警阈值时,立即启动技术会商与措施调整程序。施工参数、支护结构形式及加固范围可依据监测结果进行修正,形成闭环控制流程。数据分析结合数值模拟成果,对塑性区扩展趋势进行预测,为掘进节奏与支护强度调整提供依据。动态修正机制强调信息传递的时效性与决策执行的准确性,使施工组织始终处于可控状态,避免风险累积扩散。

5 工程应用效果与技术优化方向

(1) 典型案例支护实施效果分析:在某高水头水工隧洞TBM施工过程中,掘进至构造破碎带区段时出现掌子面掉块与侧墙变形加剧现象,围岩完整性系数显著下降,推力与扭矩波动频繁。施工单位依据既定应急支护体系,迅速启动超前小导管注浆与加密钢拱架联合措施,并同步缩短单循环进尺长度。加固完成后监测数据显示,拱顶沉降速率由原有高增长状态转为平缓变化,周边收敛值控制在允许范围内,支护结构内力分布趋于均衡。掘进参数恢复至稳定区间,刀盘扭矩波动幅度明显减小。对比处置前后施工状态,围岩变形发展曲线呈现明显收敛趋势,掌子面稳定性得到改善,掘进连续性未再受到

显著干扰。支护措施实施后的管片拼装质量满足设计要求,未出现错台及开裂现象,施工安全风险得到有效控制。

(2) 围岩稳定性控制指标对比:破碎带应急支护效果的评价依赖于多项量化指标的综合分析。通过对比加固前后的拱顶沉降值、周边收敛量、支护内力及孔隙水压力变化,可直观反映围岩稳定状态的转变。加固前围岩位移速率较高,收敛曲线呈陡升趋势,支护结构受力接近设计警戒值;实施综合支护后,位移增长速率明显降低,曲线逐渐趋于平缓,内力分布由集中状态转向均匀状态。地下水渗流量在注浆帷幕形成后显著下降,孔隙水压力得到有效释放^[5]。围岩塑性区范围通过数值反演分析呈收缩趋势,围岩应力重分布趋于合理。通过对控制指标的系统对比,可以验证应急支护措施对限制变形扩展与恢复结构承载能力的实际效果,为类似地质条件下施工参数选取提供参考依据。

(3) 应急支护体系的完善路径:在复杂构造条件下,单一技术手段难以满足突突破碎带的控制需求,应急支护体系需在实践基础上不断优化。技术层面可加强超前预报精度与监测数据集成程度,提高异常识别的时效性与准确性;结构设计方面可结合围岩分区特征,细化支护参数分级标准,实现差异化配置;施工组织方面强化专业化分工与快速响应机制,缩短措施启动时间。材料选择可引入高延性喷射混凝土与可调凝结时间浆材,提高支护结构适应变形能力。信息化管理手段的应用有助于建立风险数据库,对不同破碎带类型的处置经验进行归纳整理,形成标准化操作流程。通过技术、管理与材料多维度协同优化,应急支护体系的适应性与稳定控制能力得到持续提升。

6 结语

水工隧洞TBM掘进遭遇突突破碎带时,围岩结构劣化与施工扰动叠加,极易引发失稳风险。构建集快速识别、分级响应与综合加固于一体的应急支护体系,可有效控制变形发展,稳定掌子面结构,保障掘进连续性与结构安全。工程实践表明,技术协同与动态调控是提升复杂地质条件下施工可控性的关键环节。

参考文献:

- [1] 周荻莎,倪晖,张存慧,张雨霏,黄康.考虑卸荷松弛作用的水工隧洞穿越断层破碎带围岩稳定分析研究[J].水电能源科学,2025,43(12):104-108.
- [2] 贺兴和.水工隧洞断层破碎带坍塌处理技术研究[J].江西建材,2025(6):262-264.
- [3] 邓文学.数字孪生驱动的水工隧洞TBM掘进智能调度系统研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(12):84-86.
- [4] 周振广,祖梦琦.综合物探在水工隧洞洞顶沉降破碎带探测中的应用[J].水科学与工程技术,2023(4):78-80.
- [5] 张晓生.水工隧洞TBM预制管片埋件完善与优化探析[J].山西水利,2025(4):32-35.