

敞开式TBM大坡度始发方向精准控制技术研究与实践

徐中稳 孟佑强

中铁隧道局集团有限公司 广东 广州 510000

摘要: 敞开式TBM大坡度始发方向精准控制技术通过整合多源地质数据融合超前预报、动态调整掘进参数、激光导向与人工测量协同校核、撑靴系统稳定性增强及应急避险支护体系等技术,有效应对复杂地质、设备结构适应性及测量误差累积等挑战。实践表明,该技术可显著提升方向控制精度,降低卡机风险,缩短工期,提高施工效率与经济效益,为深埋长大隧道施工提供可靠技术支持。

关键词: 敞开式TBM; 大坡度始发方向; 精准控制技术; 实践

引言: 在深埋长大隧道施工中,敞开式TBM(硬岩掘进机)凭借高效掘进能力被广泛应用,但大坡度($>8^\circ$)始发阶段常面临地质条件复杂、设备姿态易偏移、测量误差累积等难题,导致方向失控风险陡增,严重影响施工安全与进度。为此,本研究聚焦敞开式TBM大坡度始发方向精准控制技术,通过构建多技术协同控制体系,突破传统施工瓶颈,为同类工程提供可复制的技术方案与实践经验。

1 敞开式TBM大坡度始发方向精准控制技术难点分析

1.1 地质条件复杂性

(1) 大坡度始发段常穿越多类不良地质,断层与褶皱会导致围岩完整性骤降,TBM掘进时易因受力不均引发姿态偏移;突涌水则会软化围岩,降低撑靴与岩壁的摩擦力,进一步加剧方向失控风险,多种不良地质叠加时,将大幅增加TBM姿态控制难度。(2) 千枚岩岩性松软,遇水易泥化、软化,有胀缩性,工程地质性质不好,会导致变形量较大。抗风化能力差,易风化形成岩屑,产生碎落现象。

1.2 设备结构适应性挑战

(1) 大坡度工况下,撑靴系统需承受TBM自身重力的竖向分力,若撑靴与岩壁接触面积不足或压力分布不均,易出现打滑现象;同时,坡度导致的侧向力可能使撑靴发生偏转,进而带动TBM机身偏移,使掘进轴线偏离设计轨迹,尤其在软岩段,岩壁承载力低,撑靴稳定性问题更为突出。(2) 刀盘切削硬岩需更大扭矩,而主驱动系统的功率分配若无法匹配实时切削需求,易出现局部过载。例如,当刀盘某区域遭遇坚硬岩块时,若扭矩未能及时调整分配,可能导致刀盘局部受力过大而偏摆,进而引发TBM整体姿态偏差,影响始发方向精度^[1]。

1.3 测量系统误差累积

(1) 激光导向系统是TBM姿态监测的核心,但大坡度始发段施工中,TBM掘进产生的粉尘会附着在激光接收器上,遮挡信号;隧洞内温度变化(温差可达 15°C 以上)会导致激光光路发生折射;掌子面突涌水形成的水雾也会干扰激光传播,这些因素均会造成测量数据失真,若未能及时修正,将误导姿态调整。(2) 随着掘进距离增加,测量基准点易受围岩变形、振动等影响发生微小位移,虽单次位移量较小(通常 $1\text{-}2\text{mm}$),但在长距离累积后,可能导致基准点偏差达 10mm 以上,进而使TBM姿态监测结果出现显著误差,影响始发方向的精准控制。

2 敞开式TBM大坡度始发方向精准控制技术体系构建

2.1 多源地质数据融合的超前预报技术

(1) 针对大坡度始发阶段地质条件复杂性,整合TST法(隧道地震波探测法)、TSP203(隧道地震预报系统)、超前钻探与地质雷达等多源技术,构建三维可视化地质模型。其中,TST法与TSP203可实现 $100\text{-}200\text{m}$ 范围内的宏观地质构造探测,精准识别断层、褶皱分布;超前钻探通过 $50\text{-}80\text{m}$ 深度的岩芯取样,获取围岩强度、完整性参数;地质雷达则对 30m 范围内的溶洞、裂隙水进行高精度扫描。将多维度数据导入数据平台,建立动态更新的三维地质模型,为TBM姿态调整提供提前量支撑。(2) 案例引用:某斜井工程在敞开式TBM大坡度(12.5°)始发阶段,通过多源地质数据融合技术,超前钻探发现掌子面前方 45m 处存在直径 3m 的空洞。基于三维地质模型分析,技术团队提前调整TBM掘进轴线,将推进速度从 $80\text{mm}/\text{min}$ 降至 $30\text{mm}/\text{min}$,同时增大撑靴支撑压力,避免TBM因空洞顶板坍塌发生姿态偏移,成功规避重大安全事故,保障了始发方向精准度。

2.2 动态调整的掘进参数优化策略

(1) 建立基于围岩类别的掘进参数动态匹配机制，针对Q1（极软岩）、Q2（软岩）、Q3（中硬岩）不同类别围岩，预设推力、扭矩、刀盘转速、贯入度的基准参数区间。通过TBM机身搭载的围岩压力传感器、刀盘载荷监测仪，实时采集掘进过程中的地质反馈数据，当监测到围岩类别变化时，自动触发参数调整指令：Q1类围岩采用“低推力（4000-6000KN）+低扭矩（150-200kN·m）+高转速（6-8r/min）+低贯入度（3-5mm/r）”参数组合，避免围岩过度扰动；Q3类围岩则采用“高推力（6000-11000KN）+高扭矩（300-350kN·m）+中转速（4-5r/min）+中贯入度（8-10mm/r）”参数，提升掘进效率的同时保障方向稳定^[2]。(2) 案例引用：某斜井工程敞开式TBM大坡度始发时，遭遇花岗岩段（Q3类围岩），初期采用常规参数掘进引发轻微波动。技术团队立即启动动态调整策略，将贯入度从10mm/r降至4mm/r，刀盘转速从4r/min提升至7r/min，形成“低贯入度+高速旋转”的参数组合。调整后，刀盘切削力均匀分

布，波动显著降低，TBM轴线偏移量控制在10mm以内，确保了始发方向精准。

2.3 激光导向系统与人工测量协同校核

(1) 采用“主备双系统+实时校核”的测量方案，以米度激光导向系统作为主测量系统，同时配置全站仪人工测量作为备份。米度系统通过安装在隧洞顶部的基准靶与TBM机身上的激光接收器，实时采集姿态数据（精度±2mm）；每掘进50m，采用全站仪对基准点与TBM机身关键点位进行人工复测，将复测数据与米度系统数据对比，若偏差超过3mm，立即对米度系统进行校准，实现主备系统互为冗余，避免单一系统故障导致的方向失控。(2) 引入卡尔曼滤波误差补偿算法，对米度系统采集的位置、姿态数据进行实时处理。该算法可动态识别粉尘、温度、水雾等环境干扰因素导致的异常数据，通过建立误差模型，对传感器数据进行平滑滤波与补偿修正。实际应用中，可将环境干扰引发的测量误差从±8mm降至±2mm，大幅提升导向系统数据可靠性，为方向控制提供精准依据^[3]。

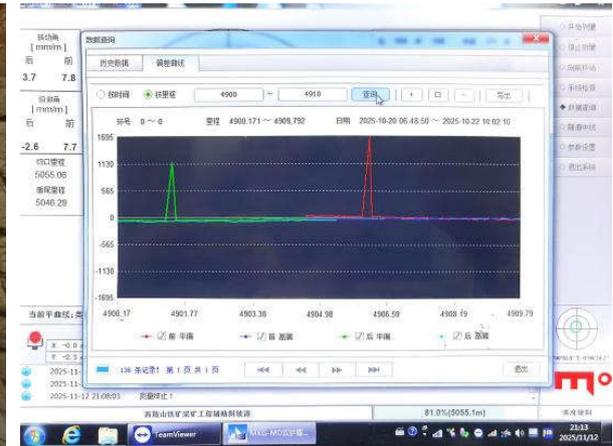


图1 TBM搭载导向系统

2.4 撑靴系统稳定性增强技术

(1) 优化撑靴油缸结构设计，通过弹簧刚度校核确保撑靴与岩壁的贴合性：根据大坡度工况下的竖向分力计算，选用刚度系数为15-20kN/mm的碟形弹簧，使撑靴在受力波动时仍能保持稳定支撑；同时设置行程限位保护装置，当撑靴伸出长度超过预设阈值（如300mm）时，自动触发液压锁止，防止撑靴过度伸出导致偏转。此外，在撑靴底部加装耐磨橡胶垫，增大与岩壁的摩擦系数（从0.3提升至0.5），有效避免打滑问题。(2) 案例引用：某斜井工程敞开式TBM在12.5°大坡度始发阶段，因撑靴压力分布不均，导致机头下沉量达15mm，影响方向控制。技术团队通过调整撑靴油缸压力分配比

例，将两侧撑靴压力差控制在5%以内，并优化撑靴接触面积（从0.8m²增至1.2m²）。优化后，机头下沉量降至3mm，撑靴系统稳定性显著提升，保障了TBM始发方向精准。

2.5 应急避险与支护体系

(1) 在TBM机身中部配置应急避难仓，内部集成制氧机（产氧量10L/min）、医疗急救箱（含止血、包扎、骨折固定设备）、双向通讯系统（可与地面控制室实时通话），同时配备应急照明、食品与饮用水储备（满足6人72h需求）。当突发岩爆、突涌水等险情时，施工人员可快速进入避难仓，为后续救援争取时间，同时避免险情对TBM姿态控制系统造成破坏。(2) 采用

“钢拱架+锚杆+喷射混凝土”联合支护方案,针对不同地质风险调整支护参数:在岩爆段,选用TH全圆钢拱架(型号I25b,间距0.8m),配合 $\Phi 25$ mm中空注浆锚杆(长度4.5m,间距1.0m \times 1.0m),喷射C30混凝土(厚度250mm),形成刚性支护体系,抵抗岩爆冲击力;在断层破碎段,增加超前小导管($\Phi 42$ mm,长度3.5m)预支护,提升围岩整体性。该支护体系可有效控制围岩变形,为TBM稳定掘进提供安全环境,间接保障始发方向精准^[4]。

3 敞开式TBM大坡度始发方向精准控制技术的工程实践与效果验证

3.1 工程背景

本工程为某矿山斜井关键控制性工程,核心斜井全长10.5km,其中始发段3km穿越复杂地质区域,最大坡度达22%,涵盖Q1(极软岩)、Q2(软岩)、Q3(中硬岩)三类围岩,且存在2处断层破碎带与3段地应力区段,对TBM始发方向精准控制提出极高要求。工程原计划采用传统盾构法施工,但因大坡度与复杂地质条件,最终选用敞开式TBM,并应用前文构建的精准控制技术体系,以保障始发阶段的施工安全与轨迹精度。

3.2 技术实施流程

(1)始发段精准定位:施工前,采用米度激光导向系统与全站仪人工测量进行联合标定,先在隧洞洞口布设3个永久基准点,通过全站仪对基准点进行24小时静态观测,消除环境因素对基准精度的影响;随后将米度系统激光发射器与基准点对齐,对TBM机身姿态(水平角、俯仰角、滚动角)进行初始校准,确保TBM初始轴线与设计轴线偏差控制在 ± 5 mm以内,为后续掘进奠定基础。(2)掘进中动态调整:建立“50m一复核、实时一调整”机制,每掘进50m,通过超前钻探与地质雷达进行地质复核,更新三维地质模型;同时,依托TBM机身传感器实时采集推力、扭矩、刀盘载荷数据,若监测到围岩类别从Q3转为Q2,立即触发参数优化指令,将推力从5000KN降至7000KN,贯入度从9mm/r降至6mm/r,避免围岩过度扰动导致姿态偏移。(3)支护与出渣协同:

采用连续皮带机实现高效出渣,皮带机速度与TBM掘进速度联动匹配(掘进速度40mm/min时,皮带机速度1.2m/s),避免出渣不及时导致掌子面积渣影响姿态;同时,在TBM后配套系统设置支护作业平台,当TBM掘进完成1个循环(1.5m)后,同步启动锚杆施工(采用液压锚杆钻机,钻孔速度30s/孔)与钢拱架安装(采用分片拼装,单次安装时间25min),实现掘进与支护无缝衔接,保障围岩稳定性。

3.3 效果评估

(1)方向控制精度:通过全过程技术管控,TBM始发段3km掘进完成后,经全站仪复测,水平偏差最大为+42mm,最小为-38mm,均满足 $\leq \pm 50$ mm的设计要求;竖向偏差最大为+25mm,最小为-28mm,符合 $\leq \pm 30$ mm的精度标准,完全达到大坡度始发方向精准控制目标。

(2)掘进效率:相较于同类工程传统施工方案,本工程应用精准控制技术后,月进尺最高达480m;同时,设备完好率达92%,刀盘磨损量较预期减少30%,有效降低设备维修频次,保障施工连续性。

结束语

综上所述,敞开式TBM大坡度始发方向精准控制技术通过多源地质数据融合、动态参数调整、激光与人工协同测量、撑靴稳定性优化及应急支护等措施,有效解决了地质复杂、设备适应难、测量误差累积等关键问题。工程实践验证了其精度与效率优势,水平及竖向偏差均达设计标准,显著降低事故率与成本。研究成果为复杂地质条件下的TBM施工提供了可靠技术支撑。

参考文献

- [1]张晓彤.敞开式TBM通过不良地质段施工技术[J].建筑技术科学,2021,(06):42-43.
- [2]宋良明.浅谈敞开式TBM隧道初期支护施工技术[J].工程地质学,2022,(08):67-68.
- [3]李永冬.敞开式TBM在瓦斯洞段中施工对策研究[J].建筑理论,2025,(07):83-84.
- [4]文世杰.敞开式TBM施工地质风险分析及控制措施研究[J].建筑理论,2025,(04):33-35.