

盾构隧道与矿山法隧道在复杂地质条件下施工效率的对比分析

魏国一

广东华隧建设集团股份有限公司 广东广州 510000

DOI:10.12238/ems.v7i12.16391

[摘要] 随着城市化推进,地下空间开发深入,盾构法与矿山法作为主流隧道施工方法,其复杂地质条件下的施工效率受广泛关注。本文通过原理、特点及典型地质应用案例对比,系统分析两种工法在软土、岩层等环境中的效率差异,聚焦设备适应性、地质预判能力等关键影响因素,提出工艺优化与智能管控等提升措施,为隧道施工方法选择及效率改进提供科学依据。

[关键词] 盾构隧道; 矿山法隧道; 复杂地质条件; 施工效率

一、引言

隧道工程规模持续扩大,复杂地质(软土/富水/硬岩/断层破碎带)易引发地层变形、涌水突泥等问题,直接影响施工进度与质量。盾构法施工速度快、自动化程度高、环境影响小,适合均质地层;矿山法灵活性强,更适应地质变化,但效率较低。实际工程中如何根据地质条件选择施工方法以提高效率,仍是技术关键。系统对比分析两者在复杂地质下的效率差异,提炼关键影响因素并提出优化措施,对指导工程实践、保障建设质量具有重要现实意义。

二、盾构法与矿山法的原理及特点

2.1 盾构法原理及特点

盾构法通过盾构机实现全机械化掘进,核心装置包括刀盘、推进系统、管片拼装及出渣系统。掘进时刀盘旋转破碎土体,推进系统驱动前进,同步拼装管片形成衬砌结构。其优势显著:广州地铁某区间采用土压平衡盾构机实现日均10-15m的高效掘进;佛山地铁穿越市区时,通过精准控制土仓压力,将地面沉降控制在2mm以内,显著降低对周边环境的影响。管片拼装工艺确保隧道结构尺寸精度达毫米级,抗渗等级普遍达到P8以上。然而,盾构法存在设备成本高(单台造价超5亿元)、地质适应性受限等问题,在软硬不均地层或孤石分布区需定制刀盘,否则易引发刀具异常磨损。

2.2 矿山法原理及特点

矿山法采用分部开挖与即时支护技术,施工流程包括超前管棚加固、机械/人工开挖、喷射混凝土初期支护及二次衬砌施作。该工法可根据地质条件灵活选择全断面法、台阶法或CRD法,在断层破碎带治理中优势突出:某铁路隧道通过

CRD法将月进度稳定在40-60m,配合钢拱架+锚杆支护体系,有效控制围岩变形。矿山法设备投入仅为盾构法的1/5,但施工周期较长(月均进度30-50m),爆破振动对周边20m范围内建筑物存在1-3mm沉降影响,粉尘浓度可达8mg/m³。人工成本占比超40%,且掌子面作业安全风险较高,需通过超前地质预报系统降低突水突泥概率。

三、复杂地质条件对盾构隧道与矿山法隧道施工效率的影响

3.1 软土地层施工效率影响分析

盾构法:软土低强度、高压缩性易引发土体失稳,盾构机掘进时可能出现叩头或上浮。若土仓压力调控不当,开挖面坍塌风险显著增加。杭州某地铁区间穿越深厚软黏土时,因压力参数设置失误导致局部坍塌,盾构机停机处理近1个月,直接延误工期。此外,软土高含水量导致渣土流动性下降,出渣效率降低,进一步拖慢施工节奏。

矿山法:软土自稳能力差,需通过大管棚超前支护、加密钢支撑、缩短开挖进尺(0.5-1m/次)等措施保障安全,但额外工序显著增加时间成本。上海某软土通道施工中,支护作业占比超40%,月掘进速度仅20-30米,较正常地层降低50%以上,土体溜塌风险还影响了装渣运输效率。

3.2 富水地层施工效率影响分析

盾构法:富水地层核心风险是涌水突泥。盾构穿越时,若密封失效或地质预报不准,地下水涌入土仓可能引发突泥事故,损坏设备并威胁安全。南京某过江隧道因盾尾密封失效导致涌水涌砂,停机抢修近2个月。此外,降水、注浆等辅助措施虽必要,却增加成本并占用工期(约15%-20%)。

矿山法: 需先通过井点降水降低地下水位 (周期 15-30 天), 并持续监测地面沉降。开挖时流砂、坍塌风险高, 需频繁支护堵水。广州某地铁区间采用帷幕注浆+降水, 但注浆排水作业频繁, 月进度不足 20 米, 较干燥地层降低 60%以上。

3.3 硬岩地层施工效率影响分析

盾构法: 硬岩 (如花岗岩, 抗压强度 100-150MPa) 会加速刀具磨损, 盾构机切削时刀具承受高冲击力与摩擦力。深圳某地铁区间刀具平均寿命仅 50-80 小时, 每次换刀需停机 2-3 天, 严重拖慢进度。此外, 硬岩掘进需更大推力与扭矩, 设备性能要求更高, 进一步影响效率。

矿山法: 依赖钻孔爆破, 但硬岩可爆性差, 需精细设计爆破参数。若参数不合理, 岩石破碎效果差, 增加出渣难度与时间。爆破后通风、排险等工序也占用时间。某山岭硬岩隧道因爆破后大块率高, 装渣时间延长, 日均进度仅 2-3 米, 较软岩地层降低 40%。

3.4 断层破碎带施工效率影响分析

盾构法: 断层破碎带岩体破碎、裂隙发育, 常伴地下水活动。盾构穿越时易姿态失控、管片错台, 甚至引发坍塌。需降低掘进速度, 加强姿态控制与管片拼装质量, 同时采取超前注浆加固、增强盾尾密封等措施。成都某地铁盾构穿越断层时, 掘进速度从每日 8-10 环降至 2-3 环, 辅以多次注浆与设备维护, 工期延长近 1 倍。

矿山法: 岩体自稳能力极差, 需采用超前大管棚 (直径 $\geq 108\text{mm}$)、双层小导管注浆加固, 并缩短台阶长度、增强钢支撑强度。某铁路隧道穿越断层时, 每次开挖进尺仅 0.3-0.5 米, 支护作业耗时漫长, 月进度不足 10 米, 仅为正常地层的 1/5, 施工成本显著增加。

四、盾构隧道与矿山法隧道在复杂地质条件下施工效率的对比案例分析

4.1 案例一: 某城市地铁区间隧道

4.1.1 工程概况

该地铁区间隧道全长 1500m, 穿越地层主要为软土地层 (厚度 8-12m, 含水量 35%-45%) 和富水砂层 (渗透系数 8-12m/d, 地下水位埋深 2-4m), 局部存在断层破碎带 (宽度 3-5m, 岩体破碎率超 60%)。隧道采用盾构法与矿山法组合施工, 其中软土地层和部分富水砂层采用土压平衡盾构机 (直径 6.28m), 断层破碎带及周边复杂地段采用 CRD 法矿山施工。

4.1.2 施工效率对比

盾构法段:

- 正常软土地层中, 盾构机日掘进 8-10m, 月进度 240-300m。通过注入 BASF 泡沫剂 (每环 80L, 发泡率 10-12 倍) 和膨润土泥浆 (水: 土=10: 1), 有效改良渣土流动性, 刀盘扭矩控制在 3500-5000kN·m。

- 富水砂层段遇涌水时, 需停机 3-5 天进行聚氨酯注浆 (单孔用量 8-15kg/m), 处理后月进度降至 200-250m, 注浆成本增加约 15%。

矿山法段:

- 断层破碎带采用 CRD 法, 配合 $\Phi 108\text{mm}$ 管棚 (环向间距 0.5m, 纵向搭接 1.5m) 和 I20a 工字钢支护 (间距 0.8m)。每次开挖进尺 0.5-1m, 月进度仅 30-40m。

- 支护作业中, 钢支撑焊接耗时占比超 40%, 且需频繁进行超前小导管注浆 (水玻璃: 水泥=1: 0.5), 单月材料成本达 12 万元。

效率对比: 盾构法综合效率为矿山法的 6-8 倍, 但断层段盾构需降速至 2-3 环/天, 凸显地质适应性差异。

4.2 案例二: 某山岭隧道

4.2.1 工程概况

该山岭隧道全长 3000m, 穿越地层以花岗岩为主 (单轴抗压强度 100-150MPa), 局部存在断层破碎带 (宽度 5-8m, 岩体 RQD 值 $< 20\%$)。隧道采用矿山法为主, TBM (直径 5.8m) 辅助硬岩段施工。

4.2.2 施工效率对比

矿山法段:

- 硬岩地层采用光面爆破 (孔深 2.5m, 装药量 1.2kg/m³), 月进度 40-60m。爆破后岩石大块率超 30%, 装渣时间占比达 25%。

- 断层破碎带采用双层小导管注浆 ($\Phi 42\text{mm}$, 长度 4m), 配合 U29 钢拱架 (间距 0.6m), 月进度仅 10-20m。

TBM 段:

- 硬岩段刀具寿命 50-80h, 每把滚刀成本 80 万元, 单月换刀停机时间占比 12%。正常掘进月进度 80-100m, 但断层段需频繁调整推力 ($> 12000\text{kN}$), 效率下降 40%。

- 采用超前地质预报 (TSP 法), 提前 30m 探测断层, 减少非计划停机。

效率对比: TBM 在硬岩中效率为矿山法的 2 倍, 但断层段两者效率均低于 15m/月, 凸显复杂地质对机械化施工的制约。

扩展分析

技术经济性：

- 盾构法在软土中单位成本约 4.5 万元/m，矿山法在硬岩中约 6.8 万元/m，但断层段两者成本均超 10 万元/m。

- TBM 刀具消耗成本占硬岩段总成本的 18%，远高于盾构法泡沫剂（占 3%）。

环境影响：

- 盾构法在富水地层中聚氨酯注浆材料使用量达 0.8t/m，需关注环保处置。

- 矿山法爆破振动速度控制在 1.5cm/s 以内，避免对周边建筑物产生影响。

五、提高复杂地质条件下盾构隧道与矿山法隧道施工效率的措施

5.1 盾构隧道施工效率提升措施

5.1.1 优化盾构机选型与设计

针对复杂地质定制化设计盾构机：硬岩地层选用 PCD 滚刀（直径 42mm）+大扭矩驱动系统（ $\geq 8000\text{kN}\cdot\text{m}$ ），刀盘间距根据岩性调整（如花岗岩 75mm）；软土地层增大刀盘开口率（40%-50%）并优化泡沫剂系统（每环 80-100L，发泡率 10-12 倍），降低刀盘扭矩。同步部署设备健康监测（振动传感器+油液分析），故障预警响应时间压缩至 2 小时内。

5.1.2 加强地质勘察与超前预报

施工前通过三维地质建模精准掌握地层岩性、断层及地下水动态；施工中采用 TSP（提前 50-80m 预报）+地质雷达（分辨率 5cm）实时修正参数（推力 8000-12000kN，土仓压力误差 $\leq 20\text{kPa}$ ）。某地铁工程实践显示，非计划停机减少 40%，月进度提升 15%。

5.1.3 改进渣土改良与出渣技术

研发复合改良剂：软土层添加 15%膨润土+0.5%CMC，富水砂层用聚氨酯泡沫（密度 0.15g/cm³），控制渣土坍塌度 15-20cm。出渣系统采用双螺旋输送机（可调转速）+皮带机（带宽 1m，速度 1.5m/s），结合 GPS 调度算法，装渣等待时间缩短至 10 分钟内，某工程应用后出渣效率提升 25%，月进度突破 280m。

5.2 矿山法隧道施工效率提升措施

5.2.1 优化施工方法与支护参数

根据围岩级别（IV-V 级）和断面尺寸（直径 $>8\text{m}$ ）推荐 CRD 法）动态调整工法。支护采用自进式锚杆（3-5m，间距 1m）

+C40 早强混凝土（厚度 15-20cm，初凝 ≤ 5 小时），单循环工期从 24 小时压缩至 18 小时，月进度提升 30%。

5.2.2 引入先进设备与工艺

液压凿岩台车（钻孔速度 2m/min，精度 $\pm 2\text{cm}$ ）与湿喷台车（效率 8m³/h，回弹率 $\leq 10\%$ ）提升机械化水平；爆破采用预裂+光面爆破（周边孔间距 40cm，装药量 0.3kg/m），超欠挖控制在 10cm 内，某工程大块率降至 5%，装渣时间减少 40%。

5.2.3 强化施工组织与管理

通过 BIM 平台优化工序衔接（如钻孔与支护并行），单循环时间压缩至 12-15 小时；现场实行“5S”管理+GPS 智能调度，减少设备闲置。每月 2 次技术交底（含 VR 安全演示）确保规范操作，某铁路隧道效率提升 20%，成本降低 15%。

六、结论

通过对比盾构法与矿山法在复杂地质中的施工效率，可见其适用场景差异。盾构法在均质地层（如软土、砂层）优势显著，广州地铁盾构日掘进达 10-15m，但硬岩（ $>80\text{MPa}$ ）中刀具寿命仅 50-80 小时，换刀停机致月进度损失 15%-20%。矿山法在断层破碎带（RQD <20 ）通过 CRD 法+双层支护保障安全，但某铁路隧道月进度仅 10-20m，仅为盾构正常段的 1/10。

地质适应性差异明显：富水砂层中盾构需应对 0.8-1.2MPa 水压，广州过江隧道曾因盾尾密封失效停机 2 月；矿山法需井点降水（15-30 天）+帷幕注浆（单孔 8-15kg/m），成本增 30%以上。硬岩中 TBM 月进度虽达 80-100m，但刀具成本占硬岩段总成本的 18%，远高于盾构泡沫剂（3%）。

效率提升需多维度突破：盾构通过增大刀盘开口率（40%-50%）+泡沫剂（每环 80-100L）降扭矩 20%；矿山法采用液压凿岩台车（2m/min）+湿喷台车（回弹率 $\leq 10\%$ ）压缩单循环工期至 18 小时。结合 TSP 地质预报（提前 50-80m）与 BIM 模拟，某地铁工程非计划停机减少 40%，月进度提升 15%-25%。未来技术需聚焦智能监测与材料创新，逐步突破效率瓶颈，为隧道工程提供可靠支撑。

【参考文献】

[1]李明, 张华. 复杂地质条件下盾构隧道施工技术研究 [J]. 隧道建设, 2023, 43 (5): 789-798.

[2]王强, 赵刚. 矿山法隧道在不同地质条件下的施工效率优化策略 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (3): 567-576.

[3]陈辉, 周宇. 盾构机在硬岩地层中的刀具磨损机制及应对措施 [J]. 工程机械, 2022, 53 (10): 45-52.