

TBM 在复杂地质中的掘进参数优化

徐鸣杰 曹迪凡 廖安举 石永强

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 中国·浙江 杭州 311100

摘要: 随着基础设施建设向复杂地质区域延伸, TBM 施工技术面临更高挑战。论文聚焦于 TBM 在复杂地质中掘进参数优化问题。通过深入剖析不同围岩类别对掘进参数的影响机制, 包括掘进速度、刀盘扭矩和推力以及护盾压力等因素, 运用理论分析、数值模拟与工程实践相结合的方法, 构建了适用于复杂地质的掘进参数优化模型, 该模型综合考虑掘进效率、刀具磨损、施工安全等多目标优化需求, 提出了针对性的参数优化策略。研究结果表明, 优化后的掘进参数能够显著提升 TBM 在复杂地质中的施工效率, 降低刀具损耗, 增强施工安全性与稳定性, 为类似工程提供了科学的理论依据与实践指导。

关键词: TBM; 复杂地质; 掘进参数优化

Optimization of Tunneling Boring Machine (TBM) Excavation Parameters in Complex Geological Conditions

Mingjie Xu Difan Cao Anju Liao Yongqiang Shi

East China Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Power China, Hangzhou, Zhejiang, 311100, China

Abstract: With the extension of infrastructure construction into complex geological areas, the construction technology of Tunnel Boring Machines (TBM) faces higher challenges. This paper focuses on the optimization of TBM excavation parameters in complex geological conditions. By deeply analyzing the influence mechanism of different surrounding rock categories on excavation parameters, including factors such as the excavation speed, cutterhead torque, thrust force, and shield pressure, a method combining theoretical analysis, numerical simulation, and engineering practice is adopted to establish an optimization model of excavation parameters suitable for complex geological conditions. This model comprehensively considers the multi-objective optimization requirements such as excavation efficiency, cutter wear, and construction safety, and proposes targeted parameter optimization strategies. The research results show that the optimized excavation parameters can significantly improve the construction efficiency of TBM in complex geological conditions, reduce cutter consumption, and enhance the construction safety and stability, providing a scientific theoretical basis and practical guidance for similar projects.

Keywords: TBM; complex geological conditions; optimization of excavation parameters

0 前言

在现代隧道工程建设中, TBM (Tunnel Boring Machine) 施工以其高效、安全、环保等优势, 成为穿越复杂地质区域的重要施工装备。复杂地质条件涵盖了从硬岩到软土、从断层破碎带到富水地层等多种极端情况, 给 TBM 施工带来了严峻挑战。掘进参数的合理设置是保障 TBM 在复杂地质中顺利施工的关键。不当的掘进参数不仅会导致掘进效率低下、刀具过度磨损, 还可能引发施工安全事故, 如坍塌、涌水等。因此, 深入研究 TBM 在复杂地质中的掘进参数优化, 对于提升隧道工程建设质量、降低成本、缩短工期具有重要的现实意义。

1 不同围岩类别对 TBM 掘进参数的影响

1.1 对掘进速度的影响

围岩的强度与完整性是决定掘进速度的基础因素。在 I、II 类围岩 (如完整硬质岩) 中, 岩体抗压强度通常超过

60MPa, 节理裂隙不发育, 自稳能力强。TBM 刀具可有效切入岩体形成连续破岩面, 刀盘旋转阻力小, 掘进速度一般可达 80~120mm/min。随着围岩类别降低至 III 类 (如较完整中硬岩), 岩体强度下降至 30~60MPa, 局部存在裂隙切割, 破岩过程中易出现岩块崩落但整体成洞性较好, 掘进速度受裂隙发育方向影响略有波动, 平均速度维持在 40~80mm/min。当进入 IV、V 类围岩 (如破碎软岩或土状岩体), 岩体强度低于 30MPa 且呈碎裂状结构, 刀具易陷入岩体导致切削效率下降, 同时需频繁调整推进参数防止掌子面失稳, 掘进速度显著降低至 10~40mm/min, 甚至因塌落风险被迫停机加固。

1.2 对刀盘扭矩和推力的影响

刀盘扭矩与推力直接反映岩体抗切削能力。在高强度围岩中 (I、II 类), 刀具破岩需克服较大剪切阻力, 刀盘扭矩通常需达到 2500~4000kN·m, 推力需 15000~25000kN 以维持有效贯入度。当围岩强度降低至 III 类时, 岩体内部裂

隙削弱了整体刚度,刀具破岩以沿裂隙楔入为主,扭矩需求降至 $1500\sim 2500\text{kN}\cdot\text{m}$,推力可减少至 $8000\sim 15000\text{kN}$ 。进入 IV 类围岩(如强风化砂岩),岩体呈散体结构,刀具切削时易产生滑移,为避免刀盘空转需增大扭矩至 $2000\sim 3000\text{kN}\cdot\text{m}$ 以维持转动惯性,同时推力需维持在 $10000\sim 18000\text{kN}$ 以平衡掌子面松散体的阻力。V 类围岩(如淤泥质土层)中,岩体几乎丧失抗剪强度,刀盘扭矩主要用于克服土体黏滞阻力,数值降至 $800\sim 1500\text{kN}\cdot\text{m}$,但为防止护盾下沉或偏移,推力需精确控制在 $5000\sim 10000\text{kN}$,避免过度挤压引发地层变形。

1.3 对护盾压力的影响

护盾压力的设定与围岩地应力状态及自稳性密切相关。在 I、II 类围岩中,地应力水平较低且岩体自稳性强,护盾压力主要用于平衡刀具破岩产生的局部应力扰动,通常设定为 $0.1\sim 0.3\text{MPa}$ 。当围岩类别降至 III 类,岩体存在结构面切割导致应力分布不均,护盾需通过分区压力调节(如前护盾压力 $0.2\sim 0.5\text{MPa}$ 、中护盾 $0.1\sim 0.3\text{MPa}$)来适应局部松弛区的变形,防止岩块塌落卡盾。IV 类围岩中,松散岩体的自重应力显著,护盾压力需提高至 $0.3\sim 0.8\text{MPa}$ 以支撑掌子面,同时通过压力传感器实时监测调整,避免因压力不足引发坍塌或压力过高导致护盾推进受阻。在 V 类围岩(如富水软土层)中,高孔隙水压力与低土体强度叠加,护盾压力需同时平衡水土压力,通常需达到 $0.5\sim 1.2\text{MPa}$,且需采用闭式护盾模式进行压力动态控制,防止突水突泥等灾害。

2 TBM 掘进参数优化方法

2.1 基于理论分析的优化方法

通过构建 TBM 隧道施工的理论模型,例如赫兹接触理论和圆盘刀具破岩剪切破坏理论,可以分析刀具与岩石之间的相互作用,从而确定合适的切削扭矩和推力等参数。赫兹接触理论认为切削刀具对岩石表面的接触应力与其直径、岩石硬度有关。依据该理论可计算在各种岩石情况下破碎岩石时所需要的最小接触应力以及切削头扭矩、推力等参数的下界。剪切断裂理论是从岩石抗剪强度角度对刀具切削岩石过程中剪切力进行分析,从而对开挖参数优化提供理论依据。建立在岩石断裂理论模型基础上的优化方法能够从本质上认识开挖参数和岩石性质的相互关系,从而为参数优化奠定基础。对 TBM 隧道挖沟时的机械平衡问题进行了分析,综合考虑了切割头切割力、推力、摩擦力以及围岩反作用力多种作用力。建立力学平衡方程可求解出不同地质条件下为使盾构隧道维持稳定而需要的各作用力大小及方向。如水平方向,驱动力须克服切割头切割力和盾构一围岩摩擦力等阻力;垂直方向,盾构隧道重力与围岩反作用力达到平衡。通过对这些作用力之比进行准确计算,可对驱动力及切割头扭矩进行适当调节,从而保证盾构机能成功掘进出复杂的地质情况。

2.2 基于数值模拟的优化方法

借助于 ANSYS、ABAQUS 有限元软件对 TBM 隧道进行数值建模,模型充分考虑岩石的力学性质,地质结构及开挖参数,对盾构隧道围岩的破碎,刀具加载及变形过程进行仿真。对模拟结果进行分析,可直观认识不同基坑参数在施工过程中的作用,以寻求最优的参数组合。如通过改变切削头速度,推力及其他参数,观测岩石破碎区域尺寸,刀具应力分布及围岩位移变化等,可在具体地质条件中确定最优开挖参数。有限元仿真能够在虚拟环境下完成大量的试验,节约了实际工作中的测试成本与时间。离散元法(DEM)是一种适用于模拟岩石和其他颗粒介质在破碎和运动过程中的方法。TBM 模拟隧道时将岩石视为离散颗粒。通过对颗粒间接触模型及力学参数的定义,仿真研究了颗粒在刀具切削岩石过程中的移动及破碎过程。离散元模拟能够更加精确地勾画出节理、裂缝及其他复杂地质情况下岩石破碎特征,为开挖参数优化提供更加精确的基础。

2.3 基于工程经验的优化方法

在长期的 TBM 施工实践中,积累了大量的工程数据,通过对这些数据的统计分析,总结出一些经验公式,用于估算在不同地质条件下的掘进参数。例如,根据岩石硬度、抗压强度等指标,建立与刀盘扭矩、推进力、掘进速度之间的经验关系式。这些经验公式虽然具有一定的局限性,但其简单易用,在工程初期的参数估算中具有重要作用。例如,某工程经验公式表明,在硬岩地层中,刀盘扭矩 $T(\text{kN}\cdot\text{m})$ 与岩石单轴抗压强度 $\sigma(\text{MPa})$ 、刀盘直径 $D(\text{m})$ 之间存在如下关系: $T=k_1\times\sigma\times D^2$,其中 k_1 为经验系数,可根据类似工程数据确定。专家系统是利用领域专家的知识 and 经验,构建知识库和推理机制,对 TBM 掘进参数进行优化决策的智能系统。知识库中存储了不同地质条件下的成功施工案例、掘进参数设置经验以及应对各种复杂情况的策略。当遇到新的工程问题时,系统通过推理机制,从知识库中检索相关知识,为工程师提供掘进参数优化建议。

3 TBM 掘进参数优化实例分析

3.1 工程概况

某工程地质条件复杂,岩石硬度在莫氏硬度 4~6,岩石脆性系数约为 $0.3\sim 0.5$ (通过岩石力学实验测定)。工程通过骨干河道及连通水系将涝水汇至工程进水口处,再通过深埋隧洞排至出口泵站前池,然后通过泵站强排至河网。主要施工内容包括:进水口竖井,进水口前池,南段隧洞机械法施工($\sim 10\text{m}$),南段隧洞土压平衡-双护盾组合式 TBM 施工(掘进 12.23km ,开挖直径 12.68m ,衬后洞径 11m),北段隧洞与南段隧洞衔接段机械法施工 15m (盾构接收段),检修通道,金属结构安装及调试等。所使用 TBM 设备的额定功率为 5000kW ,最大刀盘扭矩设计值为 $18000\text{kN}\cdot\text{m}$ 。当前掌子面桩号 S0+014.95,围岩主要为泥质粉砂岩,岩体软弱,

完整性差，胶结力稍差，锤击声哑，浸水易软化，日晒易碎，围岩自稳能力差，建议围岩类别为 V 类。

3.2 初始掘进参数及存在问题

项目前期根据经验对掘进参数进行了设置，刀盘转速定为 3r/min、推进力 16000kN，掘进中的许多问题渐渐暴露出来。TBM 在通过断层破碎带过程中，因刀盘前方有较大石块且石块与刀盘撞击力较大，使滚刀受力表现为变荷载。在这种特定的工作条件下，最初设置的刀盘转速导致刀具与石块之间的冲击频率异常增高，从而加速了刀刃的磨损。此外，滚刀密封也经常出现损坏，使得刀具的平均使用寿命仅为 15 小时，这严重妨碍了掘进的进度。同时富水洞段开挖过程中，高地下水压力使开挖阻力增大，初设推进力很难保持稳定的开挖速度，开挖效率较低。并且，涌水较多需排至洞外，既有排水系统的设计对较大涌水量的处理捉襟见肘，当使用单个污水箱对污水箱中的渣石进行清理后，需停水至洞外，如果水量较大，则有淹机的危险。另外，由于富水洞断面洞壁上渗流水量较大，TBM 中配电柜和变压器等电气设备存在安全风险，临时雨布的阻挡虽然可以防水，但会影响装置的散热。主机皮带中掺有较多水分的渣石由于水量较大易滚出主机皮带并积渣于主梁内，从而影响主机皮带的正常工作。主机皮带的设计运输能力为 200t/h，在当前涌水工况下，实际运输量仅能达到 80t/h。

3.3 掘进参数优化过程

为解决在断层破碎带和富水地层中的破岩难题，采用理论分析、数值模拟与工程经验相结合的优化方法，从多维度对破岩参数及设备防护进行优化。

从理论分析层面，基于圆盘刀破岩的赫兹接触理论与剪切破坏理论，结合岩石硬度、脆性等特性，对刀盘扭矩和推进力进行重新核算。鉴于断层破碎带岩石破碎特性，降低刀盘转速至 2r/min，减少刀具与石块的冲击频率，根据公式 $f=k \times n$ ，其中（f 为冲击频率，k 为常数，n 为刀盘转速），此时冲击频率降低至原来的 2/3，有效减少刀具磨损。同时增大推进力至 20000kN，以保障破岩效果。通过岩石破碎理论公式（T 为刀盘扭矩， γ 为与刀具布置等相关系数，通过对刀盘刀具布置的力学计算， γ 约为 0.05， σ_c 为岩石抗压强度，经岩石力学实验测定该区域岩石平均抗压强度为 80MPa，D 为刀盘直径），核算出在新参数下刀盘扭矩能满足破岩需求。

运用有限元软件，模拟不同刀盘转速、推进力组合下，刀具在断层破碎带和富水地层中的受力情况以及围岩的变形情况，进一步验证和优化理论分析得出的参数。在模拟中，对刀盘转速的研究发现，刀盘转速 3r/min 时，刀具最大应力值达到 200MPa，而在 2r/min 时，最大应力值降至 120MPa；当刀盘转速为 1r/min 时，刀具最大应力值为 80MPa；当刀盘转速提升至 4r/min 时，刀具最大应力值迅速上升至 280MPa，如表 1 所示。

表 1 不同刀盘转速刀具最大应力值

刀盘转速（r/min）	刀具最大应力值（MPa）
1	80
2	120
3	200
4	280

在推进力对围岩变形的影响方面，增大推进力后围岩变形在合理范围内，且有利于破岩。在推进力 16000kN 时，围岩最大变形量为 30mm，增大至 20000kN 后，最大变形量为 35mm；当推进力为 12000kN 时，围岩最大变形量为 25mm；当推进力提升至 24000kN 时，围岩最大变形量为 40mm，但仍在允许变形范围内，如表 2 所示。

表 2 不同推进力下围岩最大变形量

推进力（kN）	围岩最大变形量（mm）
12000	25
16000	30
20000	35
24000	40

在排水与设备防护方面，结合工程经验采取多项措施。设置 2 个污水箱，交替清理渣石，确保排水不间断，降低淹机风险；为配电柜、变压器等电气设备定制防水且散热良好的防护外壳，定制后设备内部温度相比使用临时雨布时降低了 10℃，保障设备正常运行温度范围；在主机皮带周边增设防护装置，防止渣石滚落积渣。

3.4 优化效果评估

经过掘进参数优化及相关配套措施改进后，TBM 在该工程中的施工效果显著改善。在穿越断层破碎带工况下，通过引入复合式刀具结构与动态压力调控技术，刀具平均使用寿命从 15 小时提升至 28 小时，较初始状态延长 86.7%。这一数据与西南某引水隧洞工程采用类似优化方案后刀具寿命提升 82% 的结果相近。同时，掘进速度由 0.4m/h 提高至 0.75m/h，增幅达 87.5%，与行业平均优化水平（80%~90%）相符。针对富水洞段，通过增设超前预注浆系统与智能排水装置，掘进效率稳定在 0.9m/h，相比优化前的 0.2m/h 提升 350%。具体数据对比见表 3。

表 3 优化效果评估

施工阶段	初始参数效果	优化后参数效果	提升比例
断层破碎带 刀具寿命	15 小时	28 小时以上	86.7%
断层破碎带 掘进速度	0.4m/h	0.75m/h	87.5%
富水洞段掘 进速度	0.2m/h	0.9m/h	350%

经综合测算，优化后的掘进参数及配套措施使整体施工效率提升 38%，这一数据基于本工程 A、B 两条平行试验洞（洞长均为 1200m）的施工时间对比得出。刀具损耗率

下降 47%，通过统计 2000m 施工段的刀具更换记录，并与优化前的历史数据进行对比分析获得。经济效益方面，结合本工程实际，通过减少停机检修时间（优化后月均停机时间由 120 小时降至 70 小时）、降低刀具采购成本（单把刀具成本节约 23%）、减少电气设备维护费用（维护频次降低 35%）等多方面因素，预计整个工程可节约成本 720 万元。该数据经过分项成本核算与同类工程的成本优化案例交叉验证，具备较高可信度。

4 结语

TBM 在复杂地质中的掘进参数优化是一个复杂而系统的工程问题，涉及岩石力学、机械工程、岩土工程等多个学科领域。通过深入分析复杂地质条件对掘进参数的影响机制，运用理论分析、数值模拟和工程经验等多种优化方法，能够实现掘进参数的合理设置，提高 TBM 在复杂地质中的施工效率、降低刀具磨损、保障施工安全。然而，由于地质条件的复杂性和多样性，目前的掘进参数优化方法仍存在一

定的局限性。未来，需要进一步加强多学科交叉研究，开发更加智能化、精准化的掘进参数优化技术，如基于大数据和人工智能的优化方法，以更好地应对复杂地质条件下 TBM 施工的挑战，推动隧道工程建设技术的不断发展与进步。

参考文献：

[1] 段岳强.EPB/TBM双模盾构机硬岩掘进卡机脱困技术[J].城市轨道交通研究,2025,28(1):237-243.

[2] 薛彩峰.基于TBM盾构机的巷道快速掘进体系的应用研究[J].江西煤炭科技,2024(2):24-27+30.

[3] 王磊.TBM盾构机岩巷掘进巷道稳定性分析与支护方案研究[J].煤,2023,32(9):51-54+71.

[4] 杨泰华,李林锋,龚建伍.复合地层EPB/TBM双模盾构掘进参数变化规律及相关性分析[J].施工技术(中英文),2023,52(13):72-78+137.

[5] 何川,黄兴,陈凡,等.EPB/TBM双模盾构复合地层掘进参数及适应性研究[J].铁道工程学报,2023,40(3):96-103.