

地铁盾构机在复合地层中的掘进模式选择

徐东升

中铁一局 江苏 无锡 065200

摘要：地铁项目建设满足了人们的出现要求，而地铁项目建设中不免会受到复合地层的影响，其施工难度与技术挑战也随之凸显。复合地层并非简单的地质叠加，而是指在同一隧道区间内，存在两种或两种以上岩性差异显著、力学性质突变的地层组合，这种复杂性从根本上改变了盾构机的工作环境，对掘进模式的适应性、稳定性与精准性提出了远超单一地层的严苛要求。基于此，本文系统分析盾构机掘进模式选择的核心影响因素，并从参数优化、刀具配置、姿态控制等方面提出配套技术措施，旨在为复合地层地铁盾构施工提供科学的掘进模式选择参考，保障工程安全高效推进。

关键词：复合地层；地铁；盾构机；掘进模式；选型技术

引言

城市地下地质条件的复杂性远超预期，复合地层的广泛分布给盾构机掘进带来了系统性挑战。在复合地层中，掘进模式的选择直接决定施工的安全性与经济性。若模式选择与地质条件不匹配，将引发一系列连锁问题，更可能因盾构姿态失控，引发管片错台、渗漏等结构性缺陷，最终导致工程停滞、成本超支，甚至威胁周边建筑物安全。因此，深入研究复合地层盾构机掘进模式的选择机制，本质上是破解地质复杂性与施工稳定性之间矛盾的关键，对于优化施工工艺参数、降低工程风险、提升复合地层盾构施工的可控性，具有重要的理论价值与现实指导意义。

1 复合地层对盾构掘进的核心难点

复合地层的复杂性直接导致盾构掘进面临多重技术难题，软土地层需维持较低的开挖压力以避免地表隆起，而硬岩地层则需较高压力破碎岩石，压力矛盾易引发掌子面坍塌或涌水。软土刀具在硬岩中易磨损，硬岩滚刀在软土中易偏磨，单一刀具配置难以适应多岩性切削需求。另外，不同岩性地层的掘进阻力差异大，可能导致盾构机抬头、低头或偏移轴线，影响隧道成型质量。软土盾构的螺旋输送机在处理大块岩渣时易堵塞，而泥水盾构在粘性土中可能出现管路淤积，排渣效率波动显著。

2 复合地层掘进模式选择的核心影响因素

2.1 地质条件影响

地质条件是决定掘进模式的首要因素，其核心特征

直接规定了模式的基本方向，不同岩性的物理力学性质差异对掘进模式构成硬性约束。若地层以软土、砂土等低强度岩土为主，且硬岩夹层厚度占比小于30%，土压平衡模式凭借对塑流性渣土的可控性更具优势；若硬岩段连续长度超过50米或孤石含量超过10%，泥水平衡模式的硬岩切削与排渣能力更适配；而岩性在纵向或横断面上频繁交替，则需依赖复合模式的动态调节能力^[1]。此外，岩层倾角大于30°的倾斜界面会导致盾构机受力不均，需模式具备更强的姿态补偿与压力分区控制功能。地下水的赋存状态对模式密封与压力平衡能力提出特殊要求。地下水位高于隧道拱顶且透水性强时，泥水平衡模式通过泥膜形成的止水屏障可有效控制涌水风险；地下水位较低或地层透水性弱时，土压平衡模式无需复杂的泥水系统即可维持掌子面稳定。若存在承压水层，需重点评估模式的压力调控精度，避免水压突增引发的密封失效。地层力学参数的突变程度直接影响模式的适应性。参数梯度较小时，单一模式通过参数微调即可适应；梯度较大时，需模式具备快速响应能力，否则易引发掌子面失稳或刀具过载。此外，地层的自稳时间决定了开挖面暴露后的风险窗口，自稳时间短的地层需模式具备更强的即时压力补偿能力。

2.2 工程环境约束

工程环境通过空间限制、安全要求等方面对模式选择形成约束，决定了技术方案的现实可行性。隧道穿越建筑物、管线等敏感区域时，沉降控制等级直接影响模式选择。土压平衡模式通过螺旋输送机的精细化排渣控制，可将沉降波动控制在 $\pm 1\text{mm}$ 内，更适合高敏感区；泥水平衡模式因泥浆压力传递的滞后性，沉降控制精度略低，但在大直径隧道中更具稳定性。若地表为空旷区

作者简介：徐东升，（1981.10-），汉，河北省三河市，大学本科，现有职称：中级。

域,则可优先考虑经济性更高的模式。城市核心区施工场地往往受限于周边建筑,占地面积成为关键约束。土压平衡模式无需泥水分离系统,设备总占地面积可控制在1500m²以内,适合狭小场地;泥水平衡模式需配套泥浆池、分离设备等,占地面积通常超过3000m²,更适合郊区或场地开阔段。此外,场地的地质承载力可能限制重型设备布置,需结合模式的设备重量进行评估。环保要求对模式的废弃物处理能力提出限制。泥水平衡模式产生的废弃泥浆需进行脱水处理,若场地周边缺乏处置设施,可能增加环保成本;土压平衡模式的渣土可直接外运,但需满足弃渣场的接纳标准。在水资源匮乏地区,泥水平衡模式的水循环利用率成为重要考量,而土压平衡模式对水资源的依赖度较低^[2]。

2.3 设备技术能力影响

盾构机的硬件配置与控制系统性能决定了模式的实际效能,是技术方案落地的关键支撑。刀盘设计需匹配复合地层的切削需求,开口率、刀具布置直接影响掘进效率。土压平衡盾构的刀盘若未配置滚刀,在硬岩段的掘进速度会降至<10mm/min,此时需评估是否采用带超前地质钻机的预处理方案;泥水平衡盾构的刀盘若开口率过大,在软土地段易出现泥包现象,需配置刀盘冲刷系统。此外,刀具的更换便利性对长距离复合地层施工至关重要。同时,模式的压力调控能力需匹配地层的动态变化。土压平衡模式通过螺旋输送机转速调节压力,响应时间通常为30~60秒,适合压力波动平缓的地层;泥水平衡模式通过泥浆流量与密度协同控制,响应时间可缩短至10~20秒,更适合水压骤变的环境。压力控制精度直接影响掌子面稳定性,精度不足易引发超挖或欠挖。排渣系统的适应性决定了模式的连续作业能力。土压平衡模式的螺旋输送机对粒径>200mm的岩块处理能力有限,需配套破碎装置;泥水平衡模式的泥浆管路可输送更大粒径岩块,但需确保泥浆流速>1.5m/s以防沉积。渣土改良系统的性能需匹配地层特性,软土段需增强塑流性,硬岩段需降低摩擦阻力。最后,设备的实时监测与自适应控制水平可提升模式的可靠性。具备地质超前探测功能的盾构机,可提前识别岩性变化,为模式切换预留调整时间;搭载AI参数优化系统的设备,能通过历史数据学习自动匹配最优参数,减少人工干预误差。

3 复合地层掘进模式的配套技术措施

3.1 掘进参数的动态适配与协同调控

掘进参数的实时优化是平衡复合地层开挖效率与安全的核心手段,需根据岩性变化建立多参数联动调节机制。(1)土压平衡模式的参数响应。在软土与砂层段以

低扭矩、高转速为原则,刀盘转速控制在2~4r/min,推进速度保持30~60mm/min,同时通过注入泡沫或膨润土改良渣土,使土舱内渣土塑流性指数维持在3~5,确保压力均匀传递;进入硬岩夹层时,立即切换为高扭矩、低转速模式,刀盘转速降至1~2r/min,推进速度放缓至10~20mm/min,同步提高土舱压力,避免掌子面因岩石破碎产生的空隙导致压力骤降。(2)泥水平衡模式的参数协同。针对透水砂卵石层,需强化泥膜形成能力,泥浆密度控制在1.2~1.3g/cm³,粘度保持在40~60s,同时提高循环流量以增强携渣能力;穿越粘性土层时,为防止泥浆管路淤积,需降低泥浆粘度至20~30s,添加分散剂破坏粘土颗粒团聚,并适当提高刀盘转速以切碎泥团,避免形成泥饼堵塞刀盘开口。(3)复合模式的参数过渡策略。双模切换过程中,需设置5~10环的过渡段,逐步调整核心参数。例如从土压模式切换至泥水模式时,先降低螺旋输送机转速,同步开启泥浆注入系统,使土舱压力以每环0.01MPa的速率平稳过渡至泥浆压力,避免压力波动引发掌子面失稳;协同控制型模式则通过分区压力调节,在硬岩区域局部提高刀盘扭矩,软土区域维持常规推力,实现同一断面内的差异化受力平衡^[3]。

3.2 刀具系统的针对性配置与动态管理

刀具是盾构机与地层直接作用的界面,其配置需匹配复合地层的岩性差异,同时建立全周期磨损监控机制。刀盘采用功能分区理念,针对断面内不同岩性布局专用刀具。硬岩集中区配置17~20英寸滚刀,并增设边滚刀防止边缘岩块崩落;软土或砂层区布置宽幅刮刀与齿刀,刮刀刃口采用耐磨合金堆焊以抵抗砂粒磨损;在岩性过渡带设置过渡刀具组,采用滚刀与刮刀交错排列,兼顾岩石破碎与渣土切削功能。硬岩段滚刀刀圈选用高强度耐磨钢,刃部硬度达HRC55~60,同时优化刀轴密封结构防止泥水侵入;软土段刮刀背部增设加强筋,避免在遇到局部硬点时发生变形;针对孤石高发区,在刀盘中心布置先行刀,提前破碎大块岩体,降低主刀具冲击负荷。同时,建立实时监测与定期检查融合双机制,通过刀盘内置的应力传感器与振动传感器,实时捕捉刀具切削阻力异常,判断是否存在偏磨或崩刃;每掘进50~100环停机检查,重点测量滚刀磨损量、刮刀刃口完整性及刀具螺栓紧固状态^[4]。在穿越岩性突变界面前,提前更换接近磨损极限的刀具,确保过渡段切削能力稳定。

3.3 盾构姿态与隧道成型质量控制

复合地层中地层抗力的不均匀易导致盾构姿态偏移,需通过精细化控制确保隧道轴线精度与衬砌结构稳定性。姿态实时校正技术采用三维姿态监测系统,实

时记录盾构机滚转角、俯仰角及水平偏差,当偏差超过20mm时启动自动调节程序。在软硬不均地层中,通过分区油缸压力动态分配实现姿态修正,硬岩侧油缸推力提高10~15%,软土侧保持常规推力,同时控制单次纠偏量不超过5mm/环,避免因受力突变引发管片开裂。根据隧道埋深与周边环境敏感度,将沉降控制标准划分为三级,并加密监测点布设。通过监测数据与开挖参数的反馈,当地表沉降超限时,土压模式下提高土舱压力0.02~0.03MPa,泥水模式下增加泥浆密度0.05~0.1g/cm³;若出现隆起预警,则反向调节参数,确保地层变形处于可控范围。同时,管片拼装的适应性要针对复合地层管片受力复杂的特点,采用错缝拼装与柔性连接融合的方案,相邻环管片旋转15°~30°布置,降低局部应力集中;在硬岩段选用高强度管片,并适当减小拼装间隙;软土段管片增设弹性密封垫,预留2~3mm间隙以适应后期地层沉降。拼装过程中严格控制管片姿态,确保其与盾构机轴线偏差不超过10mm,避免管片错台引发渗漏。

3.4 排渣系统的适应性改造与运行保障

复合地层渣土性质的多样性对排渣系统提出了兼容处理要求,需通过设备改造与工艺优化确保排渣通畅。

(1) 土压模式排渣系统优化。螺旋输送机采用变径变螺距设计,进料口螺距增大至300~400mm以提高进料效率,出料口螺距减小至150~200mm增强挤土效果;在含孤石或大块岩渣地层,启用螺旋机中部的破碎装置,将粒径大于300mm的岩块破碎至100mm以下;针对粘性渣土,在螺旋机进口处注入高分子分散剂,降低渣土粘附性,防止堵管。(2) 泥水模式排渣系统调整。泥浆管路采用耐磨合金衬里,弯头处设置导流板减少涡流磨损;在卵石地层中提高泥浆流速至1.8~2.2m/s,确保卵石悬浮输送;粘性土地层中,在泥水分离站前增设振动筛,预先分离泥团与大

块杂质,并定期用高压水冲洗管路,清除内壁淤积的泥皮^[5]。(3) 排渣状态的实时监测。土压模式下通过螺旋机扭矩传感器与出口压力计判断渣土输送阻力;泥水模式下监测泥浆流量、浓度及管路压力差,当浓度波动超过5%或压力差增大20%时,及时调整泥浆参数或启动清堵程序,确保排渣系统连续稳定运行。

结束语

地铁盾构机在复合地层中的掘进模式选择是一项融合地质分析、设备特性与工程需求的系统工程。土压平衡模式适用于以软土为主的复合地层,泥水平衡模式在高水压、含硬岩的复杂地层中更具优势,复合模式则为岩性频繁交替的地层提供了灵活解决方案。选择过程中需遵循地质适配、风险可控、经济可行的原则,通过地层分段、模式匹配、综合比选等方法确定最优方案,并辅以参数优化、刀具管理、姿态控制等配套措施,实现安全高效掘进。

参考文献

- [1] 薛靖,穆坤,张建新,等. 地铁盾构不同角度侧穿既有铁路桥梁桩基变形分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版),2024,41(05):56~63.
- [2] 严飞,李建旺,阿尔曼·赛力克,等. 地铁盾构隧道磨桩掘进参数优化及最优加固圈厚度研究[J]. 现代城市轨道交通,2024,(08):65~74.
- [3] 许良生. 盾构机在地铁隧道施工中的掘进姿态控制方法[J]. 工程机械与维修,2024,(05):43~45.
- [4] 何军. 地铁盾构掘进过程中受力分析及推力计算方法[J]. 天津建设科技,2023,33(05):26~30+43.
- [5] 宋天田,马杲宇,姚超凡,等. 深圳地铁岩质地层双模盾构卡机原因及对策研究[J]. 铁道标准设计,2023,67(06):131~139.