

大直径泥水盾构砂质页岩地层掘进研究

冯 帆 姜才华 唐顺龙 邓 欢 周煜航

中国水利水电第七工程局有限公司 四川 成都 610213

摘 要:砂质页岩地层具有层理发育、遇水易崩解、岩体稳定性差的特点,给大直径泥水盾构掘进施工带来诸多管控难题。本文结合该类地层地质特性与盾构设备作业规律,系统梳理掘进施工中地层干扰、刀具损耗、泥水系统失衡及姿态管控困难等各类问题,深入剖析地层结构、设备适配、参数调控及施工工艺等层面的内在成因,依托现场施工逻辑与地层运行规律,提出刀具配置、参数调控、泥水系统优化及姿态管控升级的针对性方案,有效提升复杂页岩地层盾构掘进施工的稳定性和规范性。

关键词:大直径盾构;泥水盾构;砂质页岩;地层适配;掘进管控

引言

随着地下工程建设规模不断扩大,大直径泥水盾构凭借优异的地层适应性,广泛应用于各类隧道掘进施工。砂质页岩作为地下施工中常见的软弱互层地层,岩体力学性质复杂、水理特性特殊,极易受施工扰动影响产生结构劣化。常规盾构掘进施工模式难以适配该类特殊地层的施工要求,掘进过程容易出现围岩失稳、设备损耗严重、系统运行紊乱等问题。结合地层固有特性优化掘进施工体系,化解设备作业与地质条件的适配矛盾,是保障隧道工程平稳施工的重要前提。

1 砂质页岩地层与大直径泥水盾构掘进适配体系

1.1 砂质页岩地层基本地质特性

砂质页岩属于典型的软硬互层沉积岩地层,岩体内部颗粒组成复杂,整体夹杂砂质碎屑与泥质胶结成分,岩体结构呈现明显的分层构造。这类地层岩体致密程度存在差异化特征,胶结强度整体偏弱,层理结构发育清晰,岩体各向异性表现突出。地层内部孔隙分布不均匀,自身抗扰动能力较差,外界施工扰动会直接破坏岩体原有结构平衡。砂质页岩遇水后会产生软化、崩解等物理变化,岩体整体强度大幅下降,结构完整性难以维持。地层内部还普遍存在细微裂隙发育现象,裂隙延展无固定规律,会改变岩体应力传递方式^[1]。复杂的自身结构属性,让该地层在地下掘进施工中极易出现岩体松散、结构失稳等情况,对盾构掘进施工的平稳推进形成天然制约。

1.2 大直径泥水盾构掘进作业特征

大直径泥水盾构依托泥水压力平衡原理开展地下掘进作业,依靠泥水舱内介质压力平衡掌子面围岩应

力,以此维持掘进工作面的整体稳定。设备掘进覆盖范围更广,施工断面体量更大,掘进过程中对周边地层的扰动范围会进一步扩大。整套作业体系以泥水循环系统为核心,通过介质置换、渣土输送、压力调控等一系列工序,完成土体切削与地层掘进作业。掘进过程中刀盘持续切削岩体,设备整体负荷较大,姿态调控难度相对更高。作业运行过程对地层稳定性、岩土适配性有着较高要求,地层细微的结构变化都会影响掘进状态。设备运行依赖多系统协同运转,掘进工况的动态变化会直接牵动各系统运行状态,形成区别于常规小直径盾构的施工运行特点。

1.3 砂质页岩地层盾构掘进适配逻辑

大直径泥水盾构的作业模式与砂质页岩地层的地质属性存在双向适配关系,地层条件决定掘进系统的运行状态,掘进施工方式也会反作用于地层结构。砂质页岩易软化、易崩解的特性,对泥水介质参数、舱内压力调控标准提出专属要求,常规掘进参数体系无法适配该地层施工需求。大直径盾构大范围掘进的作业特点,会放大地层原有结构缺陷,裂隙发育、层理松散等地质问题会进一步凸显。掘进施工需要依托地层固有特性调整设备运行、泥水调控、围岩管控的整体思路,依托地层地质规律匹配对应的掘进作业模式。通过适配性的施工调控,削弱地层不良属性对掘进作业的干扰,化解设备运行与地层工况之间的矛盾,实现盾构掘进作业与砂质页岩地层环境的协调适配。

2 砂质页岩地层大直径泥水盾构掘进现存难点

2.1 地层岩土特性带来的掘进干扰问题

砂质页岩特殊的岩土结构会对盾构掘进作业形成持

续性干扰,层理发育与胶结偏弱的岩体属性,让掌子面岩体抵抗外力破坏的能力处于较低水平。掘进作业产生的外力扰动会打破岩体原始应力平衡,诱发表层岩体松散脱落,破坏工作面的完整状态。岩体含砂量不均的特质,会让地层力学性质呈现阶段性差异,掘进推进过程的受力状态始终处于波动变化之中。岩体遇水后产生的软化崩解现象,会持续改变掌子面岩土结构强度,破坏泥水压力与围岩应力的平衡关系^[2]。这类地层先天的结构缺陷,大幅提升掘进作业的可控难度,给施工推进带来持续性的地质干扰。

2.2 刀盘刀具磨损与掘进扰动问题

大直径盾构刀盘切削跨度较大,整体切削负荷分布并不均匀,砂质页岩内部夹杂的砂质颗粒硬度较高,会对刀具表面形成持续性摩擦切削损耗。长期掘进过程中,刀具刃口会逐渐钝化,切削效率逐步下降,刀盘整体切削性能持续衰减。岩体分层结构会造成刀盘切削受力不均,局部区域出现过载切削的情况,加剧刀具局部磨损甚至微量破损。切削作业引发的地层扰动会向围岩深层传递,破坏周边岩体的结构完整性,让原本稳定性偏弱的地层出现更多裂隙发育,进一步恶化掘进施工的地层环境。

2.3 泥水系统适配地层掘进的适配短板

常规泥水系统的运行参数针对常规均质地层设计,无法完全匹配砂质页岩地层的掘进施工需求。砂质页岩遇水崩解产生的细小颗粒会混入泥水介质,改变泥水原有黏度与密度属性,打乱泥水循环的运行平衡。地层岩土颗粒成分复杂,渣土颗粒粒径分布无序,容易造成泥水输送管路淤积、介质分层等现象,影响渣土排出效率。现有泥水调控模式缺乏针对性适配机制,无法根据地层岩土变化及时调整介质状态,难以稳定维持掌子面压力平衡,无法充分适配该类特殊地层的掘进施工需求。

2.4 掘进姿态与地层稳定性管控难题

大直径盾构自身体量偏大,掘进过程的态度调控灵敏度偏低,地层岩土性质的细微变化都会引发掘进轨迹出现偏移波动。砂质页岩地层各向异性明显,掘进阻力在不同区段存在明显差异,设备推进过程容易产生受力偏差,增加姿态校正的管控难度。掌子面岩体频繁出现松散、崩解问题,会造成工作面应力分布紊乱,围岩稳定状态难以长效维持。施工过程中姿态调控与地层维稳无法形成有效联动,单一维度的调控方式难以应对复杂地层变化,整体施工管控难度大幅提升。

3 砂质页岩地层盾构掘进难点成因分析

3.1 地层岩性结构的内在影响因素

砂质页岩特殊的岩性结构是各类掘进难题产生的根源,沉积成型的分层构造让岩体整体均匀性较差,胶结结构整体松散脆弱。岩体内部砂质组分与泥质组分交错分布,力学性能存在明显差异,整体抗扰动、抗形变能力处于较低水平。外部掘进扰动作用于掌子面时,岩体原始应力状态会出现不均匀重分布,薄弱结构层极易出现开裂与脱落现象。水体渗入岩体裂隙后,会弱化颗粒间的胶结作用,加速岩体软化崩解,破坏工作面原有稳定状态^[3]。原生结构带来的力学缺陷,让该地层对盾构掘进施工的敏感度远高于普通地层,各类掘进干扰问题频繁出现。

3.2 掘进设备适配地层的适配性局限

现有大直径泥水盾构设备多针对均匀硬质地层设计,结构配置与运行模式难以适配砂质页岩的复杂掘进环境。刀盘整体结构与刀具布置方式偏向常规地层切削作业,无法适配分层、软硬交错的岩体结构特性。岩体切削过程中受力分布不均,刀盘局部区域长期承受偏高负荷,刀具磨损速率大幅加快。大直径设备整体自重较大,掘进作业对掌子面围岩的扰动范围更广、扰动强度更深。设备固有运行模式无法根据砂质页岩地层的结构变化灵活调整,结构性适配缺陷持续诱发各类设备损耗与地层扰动问题。

3.3 泥水参数匹配地层的调控短板

泥水系统参数调控体系缺乏针对性,难以应对砂质页岩遇水异变的地质特征。常规施工沿用固定的泥水密度、黏度控制标准,参数调整方式较为固化,难以适配地层岩土性质的动态变化。岩体崩解产生的微细渣土颗粒会持续改变泥水介质组分,破坏泥水体系的稳定性。滞后的参数调控模式无法及时抵消介质性能变化带来的负面影响,掌子面压力平衡难以长效保持。粗放的泥水调控模式无法适配特殊地层的精细化掘进需求,逐渐形成泥水系统运行的各类适配短板。

3.4 掘进管控工艺的适配性不足

现阶段盾构掘进管控工艺体系,难以适配砂质页岩地层复杂多变的掘进工况。现有施工管控模式依托常规地层施工经验搭建,管控标准与操作流程偏向标准化施工,缺少针对特殊软弱互层地层的差异化管控手段。掘进姿态调控、围岩防护、施工扰动控制等工艺较为单一,无法应对地层各向异性带来的施工波动。各类管控工序独立开展,未形成联动调控机制,地层出现结构变

化时无法及时做出适配调整。工艺体系的适配缺陷,大幅降低掘进施工的可控性,提升地层稳定与姿态管控的施工难度。

4 砂质页岩地层大直径泥水盾构掘进优化策略

4.1 适配砂质页岩地层的刀盘刀具配置优化

针对砂质页岩分层发育、岩体软硬不均的地质特征,需针对性改良刀盘刀具整体配置体系,适配特殊地层的切削作业需求。结合地层砂质颗粒耐磨、泥质岩体易崩解的特性,调整刀具整体布局密度,优化刀盘开口率参数,适配分层岩体的切削破碎规律。对刀具材质与结构进行升级,选用耐磨性能更强的刀具构件,抵御砂质颗粒长期摩擦带来的损耗问题^[4]。优化刀盘整体受力结构,改善大直径刀盘切削过程中的负荷分布状态,缓解局部区域过载受力的情况,减少刀具单边磨损、局部破损等现象。通过结构性优化,提升刀盘对软弱互层地层的适配能力,降低掘进过程中的设备损耗,保障切削作业持续稳定推进。

4.2 泥水盾构掘进参数精细化调控优化

摒弃传统固定化的掘进参数管控模式,建立适配砂质页岩地层动态变化的精细化调控体系。结合地层岩体强度、裂隙发育程度的区段差异,细化掘进推进速度、刀盘转速、掘进扭矩等核心参数的管控标准,摆脱统一参数适配复杂地层的局限。根据掌子面岩体遇水软化、崩解的实时状态,动态调整掘进作业参数,弱化地层物性变化对掘进工况的干扰。针对大直径盾构掘进扰动范围广的特点,适度优化参数调控梯度,避免参数突变引发的围岩应力剧烈波动。精细化的参数调控模式可以适配地层差异化施工条件,提升掘进作业的平稳性与可控性。

4.3 泥水循环系统适配地层工况优化

砂质页岩掘进过程中产生的微细岩渣极易混入泥水体系,改变泥水介质原有物理特性,造成泥水循环运行紊乱,需要针对地层工况完成泥水循环系统的全方位优化。结合岩体遇水崩解、细颗粒产出量大的特点,重新界定泥水密度与黏度的合理调控区间,优化泥水基础配比方案,增强泥水介质抗杂质干扰的能力。升级泥水循环净化处理流程,增设多级过滤与沉淀装置,高效拦截循环水体中的微细渣土颗粒,保持泥水介质组分均匀、性能稳定。依托掌子面围岩应力变化规律,搭建动态压力调控机制,实时调整舱内泥水压力数值,维持掘进工作面的应力平衡状态。优化管路输送结构与运行模式,

缓解微细颗粒堆积、介质分层、管路堵塞等常见问题,保障泥水循环系统持续高效运转,满足复杂地层长距离掘进的施工需求。

4.4 地层扰动与掘进姿态管控工艺优化

砂质页岩地层各向异性显著、围岩抗扰动能力弱,大直径盾构掘进易出现轨迹偏移、围岩失稳等问题,需要针对性升级掘进管控工艺体系。搭建系统化的围岩扰动防控机制,通过优化切削方式、控制掘进扰动强度,抑制岩体裂隙扩张与表层松散脱落,最大限度保留围岩原始结构完整性。完善盾构姿态管控工艺,细化全过程姿态监测内容与校正流程,针对地层软硬不均引发的掘进阻力偏差,制定分层适配的姿态校正方案,及时修正掘进轨迹偏移问题。打破各类管控工序独立运行的局限,构建一体化施工管控模式,将围岩稳定防护、掘进姿态校正、施工扰动防控等内容深度融合。细化各施工环节的操作规范与管控标准,提升复杂地层工况下的施工管控精度,持续保障盾构掘进轨迹规整可控,实现地层状态与掘进工况的长期稳定^[5]。

结束语

砂质页岩地层的特殊岩性与大直径盾构的作业特性形成多重施工矛盾,各类掘进难题均由地层、设备、参数、工艺多维度因素共同诱发。通过梳理地层与盾构掘进的适配逻辑,明确各类施工隐患的形成机理,从设备配置、参数调控、泥水系统、施工工艺多个维度完善掘进管控体系,能够有效改善复杂地层的盾构施工工况。整套优化思路可有效规避砂质页岩地层掘进的各类隐患,提升大直径泥水盾构施工的精细化与规范化水平,为同类地层隧道掘进施工提供成熟的优化思路。

参考文献

- [1] 舒计城. 粉细砂地层大直径泥水盾构掘进控制分析[J]. 铁道建筑技术,2024(12):182-185,198.
- [2] 肖志国,谭善文,陈浩宏,等. 富水软土砂质地层泥水盾构穿江施工风险对策研究[J]. 广东水利水电,2026(5):87-92.
- [3] 崔明,朱荣辉,于方正,等. 山前斜坡带泥水盾构掘进参数特征及分布形态[J]. 地下空间与工程学报,2025,21(z2):803-811.
- [4] 王强. 泥水盾构砂浆填仓结合江中注浆带压开仓关键技术[J]. 工程机械,2025,56(8):134-136.
- [5] 孙明祥. 大直径泥水盾构穿越江底富水砂层冒浆处置技术[J]. 城市轨道交通研究,2025,28(5):55-60,67.