

复杂地质条件下隧道盖挖法施工及进洞施工关键技术

奚太龙

新疆生产建设兵团交通建设有限公司 新疆 石河子 832017

摘 要: 复杂地质区域连拱隧道进洞施工易受松散围岩、不均应力及结构联动受力等因素干扰, 常规施工工艺难以适配复杂地层工况, 施工现场常出现围岩扰动失控、结构稳定性不足等问题。本文结合复杂地质隧道施工实际情况, 系统分析进洞施工的核心难题与传统工艺短板, 从超前围岩加固、分层开挖组织、结构动态管控等方面优化盖挖法施工技术体系, 梳理适配复杂场地的标准化施工流程, 可为同类隧道进洞施工提供实操技术参考。

关键词: 连拱隧道; 盖挖法; 复杂地质; 围岩加固; 进洞施工

引言: 连拱隧道空间布局紧凑, 在山区短途交通通道工程中应用广泛, 但其双洞联动的特殊结构形式, 叠加洞口段偏压、围岩风化破碎等不良工况, 施工管控难度远超常规分离式隧道。多数施工现场沿用常规地质通用施工模式, 极易引发围岩失稳、结构偏移、洞口坍塌等质量问题。针对复杂地质隧道进洞施工的各类工程痛点优化施工技术与工序流程, 能够有效强化洞口施工稳定性, 保障隧道进洞作业及后续主体施工的有序开展。

1 复杂地质地形施工特性及进洞施工核心难题

1.1 复杂地质地层与洞口地形特征

复杂地质区域隧道洞口山体岩层杂乱, 岩土体完整性极差, 普遍存在强风化岩层、软弱夹层、密集裂隙及富水层等不良地质, 岩体胶结能力弱、结构松散, 自稳性能极低。同时, 山区隧道洞口多位于边坡陡坡、冲沟、偏压地段, 地形起伏剧烈、作业场地狭小, 无平整施工平台, 大型机械设备转运、安装、作业空间严重不足^[1]。浅埋洞口段岩体完整性系数普遍低于 0.35, 地层应力分布极不均匀, 受地形偏压、岩层差异化影响显著, 常规开挖作业极易引发岩体松动、剥落、局部坍塌。此类复杂地质与受限地形叠加, 是导致常规施工工艺失效、二衬台车无法进场、隧道难以正常进洞的核心诱因。

1.2 复杂地形下进洞施工核心制约因素

一是常规开挖工艺适配性差。传统明挖法需大面积开槽、平整场地, 复杂陡坡地形无作业空间, 且大开槽施工会大范围扰动周边围岩, 诱发边坡失稳; 常规暗挖法直接进洞无前置防护, 松散围岩临空暴露风险极高, 极易出现塌孔、偏帮问题。二是大型设备进场条件缺失。隧道二衬施工、后续掘进依赖台车、大型支护设备, 复杂洞口地形狭窄、断面未规整、无设备安装平

台, 完全不具备台车进洞、组装及作业条件, 无法开展标准化衬砌施工。三是围岩稳定管控难度大。复杂地质围岩应力动态波动, 地形偏压导致隧道断面受力不均, 常规支护工艺无法适配动态形变, 施工扰动易引发裂隙扩张、围岩失稳, 进一步压缩有效作业空间, 形成施工恶性循环。

1.3 传统施工技术短板

传统隧道进洞施工多采用“先开挖、后支护”的作业模式, 工艺固化、灵活性差, 仅适用于地形平整、围岩稳定、场地充足的施工场景。面对复杂受限地形, 存在明显技术短板: 一是超前支护参数固定, 无法适配多变地层, 松散围岩加固不彻底; 二是开挖扰动大, 无前置结构防护, 洞口成型稳定性差; 三是未针对设备进场优化施工流程, 无法解决台车就位难题; 四是围岩形变管控被动, 难以应对复杂地质动态应力变化。

2 复杂地质隧道盖挖法施工核心技术

2.1 盖挖法施工工艺原理

盖挖法是适配复杂地形、受限空间隧道洞口施工的前置核心工艺, 区别于传统明挖、暗挖施工, 其核心原理为: 先支护、后开挖、先盖顶、后成型。针对不具备常规开挖、台车进洞条件的复杂洞口, 首先对洞口边坡、围岩开展超前预加固, 施工顶部盖板及围护支护结构, 利用成型顶盖结构锁定山体围岩、封闭作业空间, 再分层分步开挖下部土体、规整洞口断面, 最终完成洞口永久支护及场地平整, 为大型设备进洞、隧道正式进洞施工创造标准化作业条件^[2]。该工艺核心逻辑为通过顶部结构提前受力、阻隔外部地形扰动, 从根源解决复杂陡坡、松散围岩、狭小场地带来的施工难题, 彻底破除设备进场受限壁垒。

2.2 盖挖法施工技术特点

结合复杂地质隧道洞口施工工况，盖挖法具备适配性强、安全性高、可控性好、成型效果优的显著特点，具体如下：（1）地形适配性极强。无需大面积平整场地、无需大规模开槽，可直接在陡坡、冲沟、偏压等复杂受限地形施工，完美适配山区隧道洞口复杂工况，解决常规工艺无法施工的难题。（2）围岩扰动极小。遵循“先护后挖”原则，顶部盖板提前成型、提前承载，大幅降低开挖过程对松散风化围岩的扰动，有效抑制裂隙扩张、岩体坍塌，大幅提升洞口整体稳定性。（3）快速创造设备进场条件。通过盖挖施工可规整洞口断面、平整作业平台、标准化成型洞口结构，彻底解决二衬台车、大型掘进设备无法进洞、无法组装作业的核心问题，为后续隧道主体施工提供基础保障。（4）施工安全性高。顶盖结构可有效抵御山体偏压、边坡落石、雨水冲刷等外界干扰，封闭作业空间，规避复杂地质露天施工的安全隐患，施工全过程风险可控。（5）工序灵活可调。可根据围岩风化程度、地形起伏状态动态调整支护参数、开挖分层厚度，适配多变的复杂地质条件，施工容错率高。

2.3 盖挖法施工工程应用场景

盖挖法主要应用于不具备常规开挖、大型设备进洞条件的复杂隧道洞口工况，核心适配场景包括：一是山区陡坡、悬崖、冲沟地段隧道洞口，作业场地狭窄、地形起伏极大，无法开展明挖大面积施工；二是洞口围岩强风化、破碎松散、富水发育，常规暗挖直接进洞易发生坍塌、失稳的高危地段；三是洞口偏压严重、边坡稳定性差，大开槽施工易诱发山体滑坡、边坡垮塌的工况；四是洞口断面不规则、无平整作业平台，二衬台车、大型施工设备无法进场、组装及作业的隧道前置施工场景。在复杂地质隧道进洞前置施工中，盖挖法可有效弥补传统工艺短板，是破解受限地形隧道施工停滞、设备无法就位、围岩失稳的关键技术手段。

2.4 复杂地质盖挖法标准化施工流程

结合复杂地质施工要求，以“加固围岩、成型顶盖、规整断面、创造进场条件”为核心，标准化施工流程如下：（1）洞口前置预处理：清理洞口表层松动岩土、悬浮碎石，修整边坡轮廓，针对裂隙发育、富水地层开展注浆封堵、控水防渗预处理，提升原始岩体整体性。（2）超前支护布设：采用差异化超前小导管、管棚支护，针对软弱破碎区段加密支护参数，强化洞口围岩前置加固效果。（3）顶部盖板及围护结构施工：浇筑隧

道洞口顶部钢筋混凝土盖板，施作两侧围护支护结构，形成封闭稳定的顶部承载体系，锁定山体应力。（4）分层分步开挖：在顶盖防护下，自上而下分层开挖下部土体，严控单次开挖厚度，杜绝超挖、欠挖，最大限度降低围岩扰动。（5）初期支护跟进：开挖完成后立即喷射混凝土、布设锚杆、安装钢拱架，快速封闭临空面，形成永久初期支护体系。（6）洞口规整与场地整平：修整隧道进洞断面形态，平整洞口作业平台，优化作业空间，满足二衬台车进场、组装及后续施工要求。

3 复杂地质隧道进洞前置加固关键技术

3.1 差异化超前支护加固技术

摒弃传统统一化支护模式，根据洞口不同区段围岩风化程度、岩体完整度、裂隙发育状态，布设差异化超前支护体系。围岩相对完整区段，适度简化支护参数、优化施工工序；强风化、破碎软弱区段，加密小导管、管棚布设间距，增大注浆压力与加固范围，全方位填充岩体内部裂隙^[3]。同时结合隧道洞口断面形态调整支护倾角，让超前支护与盖挖顶盖结构形成整体受力体系，补齐松散围岩承载短板，为盖挖施工提供稳定基础。

3.2 洞口围岩预注浆改良技术

针对复杂地质岩土体松散、孔隙密集、整体性差的特点，采用深浅分层注浆工艺开展洞口围岩改良。浅层注浆封堵表层裂隙、压实松散岩体，提升表层围岩密度；深层注浆加固深部软弱夹层，串联破碎岩体，形成整体承载结构。通过预注浆改良，从根源提升洞口围岩自稳能力，规避盖挖开挖过程中岩体松动、脱落、坍塌问题，保障施工全过程稳定。

3.3 富水地层控水防渗技术

富水复杂地层中，地下水持续渗透会软化岩体、降低围岩强度，严重影响盖挖结构成型质量。采用“超前导排+注浆封堵”组合工艺，疏导地层积水，封堵渗水通道。通过超前泄水孔排出多余地下水，减小水压力对围岩的挤压破坏；利用防渗注浆材料填充透水裂隙，形成封闭防渗层，优化盖挖施工地质环境，防止水体侵蚀引发的结构变形、围岩失稳。

3.4 松散围岩快速封闭防护技术

复杂松散地层岩体胶结能力极差，盖挖分层分步开挖作业会持续扰动围岩，临空面岩体裸露后极易快速松散、剥落、掉块，甚至诱发局部坍塌，直接影响盖挖成型质量与作业安全。施工中严格遵循“随挖随护、快速封闭、全程跟进”的防护原则，严控开挖与支护工序间隔时长，每段分层开挖完成后，立即开展湿式混凝土喷射作业，快速封

闭全部临空面,最大限度缩短围岩无防护裸露时长。通过表层刚性封闭锁定松散岩体结构,有效限制围岩表层裂隙扩张、岩体滑移与松散变形,持续维持洞口围岩整体完整性与稳定性,杜绝盖挖施工间歇期围岩失稳问题,保障盖挖施工连续、高效、安全推进。

4 盖挖法配套隧道进洞施工关键管控技术

4.1 分层分步精细化进洞开挖技术

依托盖挖成型的稳定洞口围护结构与顶盖防护体系,采用分层、分步、小幅、短进尺的精细化掘进工艺,严格禁止一次性大断面、大进深开挖,规避大规模施工扰动破坏围岩平衡状态。施工中严格遵循自上而下、分层分段、对称开挖的标准化顺序,结合现场岩层软硬程度、围岩完整状态、应力监测数据,精准控制每层开挖厚度、掘进长度与断面开挖范围^[4]。全程保持匀速平稳掘进,缓慢、有序释放地层内部积聚的构造应力,彻底避免应力突变引发的围岩松动、偏移、坍塌等问题。每循环开挖完成后及时人工修整隧道断面,精准处置超挖、欠挖缺陷,保障进洞断面轮廓规整、尺寸精准,完全适配二衬台车安装、行走、衬砌作业的标准化要求,为后续主体施工提供优质断面条件。

4.2 受限空间设备进场与作业管控

针对复杂地形原有场地狭窄、断面杂乱、无作业平台,大型设备无法进场就位的核心难题,依托盖挖施工规整的平整洞口作业平台与标准隧道断面,制定受限空间专项设备进场、组装、作业管控方案。提前清理洞口杂物、平整压实作业场地,优化设备进场通道,消除空间障碍物;根据隧道实际断面尺寸、曲率参数定制适配型窄体二衬台车,规避受限空间设备碰撞问题。严格执行“分段运输、现场模块化组装、逐级调试”的作业流程,分步完成台车运输、拼接、校准与试运行。全程严控设备进场、安装、调试、作业全流程精度,实时监测设备与支护结构的安全间距,规避结构碰撞、设备偏移、支护损伤等问题,确保台车设备完全适配复杂地形进洞施工工况,满足后续隧道主体衬砌连续作业需求。

4.3 洞口结构稳定与形变动态管控

复杂地质地层应力具备动态波动、持续变化的特征,盖挖施工完成后,洞口围岩仍会产生缓慢形变,易引发结构沉降、偏移等隐患。为此需建立全覆盖、全天候的围岩形变与结构应力动态监测体系,在洞口围岩、盖挖顶盖、侧边围护结构、初期支护关键点位布设监测点位,实时跟踪

围岩沉降、断面收敛、结构应力变化数据。针对偏压区段、软弱夹层、富水破碎带等高危区域,加密监测频次与点位,采取主动预判、动态调控的管控模式。根据监测数据动态微调支护参数、优化开挖进尺与施工节奏,及时处置形变超标、应力集中、结构偏移等安全隐患,长效保障洞口结构整体稳定性与承载可靠性,为隧道持续、安全进洞施工筑牢核心安全防线。

4.4 工序衔接精细化管控

针对复杂地质施工工序繁杂、衔接难度大、围岩空置失稳风险高的特点,全面优化盖挖施工、前置加固、进洞开挖、初期支护、设备作业、成型验收各工序的衔接流程,建立闭环式工序管控机制。严格压缩各工序间隔空置时间,最大限度减少围岩无防护暴露周期,杜绝工序脱节引发的围岩裂隙扩张、岩体松动等问题。固化形成“洞口预处理—盖挖结构成型—围岩前置加固—断面规整整平—大型设备进场调试—分层进洞开挖—支护闭环成型”的标准化施工链路,实现各工序无缝衔接、有序推进^[5]。

结束语

适配复杂地质条件的连拱隧道盖挖进洞施工技术,构建了从超前加固、盖挖施工到精细化开挖支护的完整作业链路,有效弥补传统施工工艺的诸多缺陷。施工过程中结合现场地层变化与地形特征动态调整施工参数,可有效削减施工扰动带来的负面影响,持续维系围岩与隧道结构的整体稳定性,切实保障复杂地质隧道进洞施工的作业质量与施工安全,为山区复杂隧道工程施工提供可靠技术支撑。

参考文献

- [1] 王喜才. 复杂地质条件下连拱隧道进洞施工技术[J]. 交通世界, 2026(4): 225-227.
- [2] 王明江, 慈新航, 陈俊武, 等. 浅埋大偏压双洞六车道无中导洞连拱隧道进洞施工技术[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(1): 242-248.
- [3] 杨德智, 张杰, 欧阳娟. 浅埋偏压连拱隧道进洞施工关键技术[J]. 交通世界, 2026(8): 141-143.
- [4] 包珍. 偏压滑坡体连拱-分岔隧道进洞施工技术研究[J]. 铁道建筑技术, 2022(7): 193-197, 220.
- [5] 段晓彬, 张涛, 钱伊默, 等. 浅谈连拱隧道冲沟进洞方案[J]. 工程建设与设计, 2023(3): 110-112.