

小直径TBM洞内常压刀盘修复施工技术研究

张引兵

中国水利水电第三工程局有限公司 陕西 西安 710024

摘要：针对小直径TBM隧道断面狭小、围岩复杂、刀盘易磨损开裂且洞内修复难度大的工程难题，本文系统分析常压刀盘病害类型、失效机理及洞内修复工况约束条件。围绕前期预处理、常压开仓作业、病害专项修复、设备调试复位等核心工序，梳理全套关键施工技术，制定针对性质量管控与安全防护措施，优化施工工序与成本管控方案，有效解决小空间刀盘修复难题，可为同类隧道工程施工提供技术参考。

关键词：小直径TBM洞内；常压刀盘；修复施工技术

引言：小直径TBM多用于小断面隧道工程，掘进时受复杂地层、冲击摩擦荷载及水土侵蚀作用，刀盘易出现刀具破损、结构开裂、密封失效等病害，严重影响掘进效率与施工安全。受隧道空间狭小、围岩渗漏水等有限作业条件制约，传统修复技术适配性差、风险高、效率低。本文探究洞内常压刀盘修复核心技术，优化施工工艺与管控体系，为TBM安全高效掘进提供技术支撑。

1 小直径TBM常压刀盘病害特征及修复工况分析

1.1 小直径TBM刀盘结构及工作原理

(1) 小直径TBM刀盘整体结构组成与参数特征。小直径TBM刀盘采用紧凑型整体钢结构，主要包含面板、中心筒体、刀具座与支撑筋板等核心构件，结构紧凑、空间利用率高。与常规刀盘相比，其直径、壁厚更小，整体刚度较低，刀具布置更为密集，参数适配小断面隧道窄空间、短行程的掘进工况。(2) 常压开仓作业的设备适配条件与核心原理。常压开仓依靠密封系统与配套支护设备，通过封闭掌子面隔绝地层水土压力，将仓内高压环境转换为常压作业环境。施工需配备完整密封组件、临时支护及通风排水设备，为人工检修提供安全无压作业条件^[1]。(3) 刀盘掘进受力及磨损失效机制。掘进过程中刀盘受挤压、摩擦与冲击复合荷载作用，刀具持续与岩体接触磨损。硬岩地层易造成刀具冲击疲劳损伤，软岩及复合地层泥沙会加速构件磨耗，长期循环受力会引发部件老化与结构损伤，逐步产生各类刀盘病害。

1.2 刀盘典型病害类型及成因分析

(1) 刀具磨损、崩齿、脱落等表层病害成因。此类病害多由地层岩性复杂、掘进参数不合理导致。硬岩掘进瞬时冲击易造成刀具崩齿，砂质地层摩擦加剧刀具均匀磨损，同时刀具紧固不到位、掘进速度过快，易引发刀具松动脱落。(2) 刀盘面板变形、开裂、焊缝失效等结构病害成因。刀盘长期承受不均匀掘进荷载，局部

应力集中易引发面板微变形与裂纹。施工持续振动叠加水土侵蚀作用，会弱化焊缝力学性能，最终导致焊缝开裂、脱焊失效，破坏刀盘整体结构完整性。(3) 刀盘螺栓松动、密封损坏等附属部件病害成因。掘进持续振动会持续消耗螺栓预紧力，造成螺栓松动、滑脱。密封构件长期接触水土介质，易出现老化、磨损与腐蚀，进而引发密封失效，出现仓内渗水、进渣等问题。

1.3 洞内常压修复工况约束条件分析

(1) 小直径隧道作业空间受限约束。小直径隧道断面狭小，刀盘周边作业空间狭窄，大型检修设备无法进场，仅可依靠人工和小型机具施工，构件拆装、焊接修复操作难度大，施工方式受到严格限制。(2) 复杂地层围岩稳定性与渗漏水工况约束。软弱地层掌子面围岩稳定性差，修复过程易发生掉块、坍塌风险。同时地层渗漏水问题突出，易浸润作业面、影响焊接与检修质量，增加施工安全隐患。(3) 常压作业安全管控与施工效率约束。常压开仓需严格落实通风、围岩监测、防渗水等安全管控措施，流程繁琐。受限空间人工作业效率低，且需频繁停机排查安全隐患，大幅制约刀盘修复施工整体效率。

2 小直径TBM洞内常压刀盘修复关键施工技术

2.1 施工前期准备与作业面预处理技术

(1) 停机定位与刀盘固定加固工艺。结合隧道掘进姿态与刀盘病害位置精准停机调角，将病害区域对准作业窗口，锁定TBM推进、回转及驱动系统，防止设备自主位移。针对小直径刀盘刚度低、易偏移的特点，采用型钢支撑与液压顶紧装置进行多点对称加固，约束刀盘径向与轴向位移，抵消自重及围岩压力引发的微变形，为后续修复作业提供稳定施工条件，保证施工精度。

(2) 隧道作业面围岩加固、封水防渗处理技术。针对小断面隧道围岩稳定性差、渗漏水多发问题，采用超前支

护配合局部注浆工艺。对掌子面松散围岩实施锚杆+喷射混凝土加固,闭合岩体裂隙,提升围岩整体稳定性。对渗水区域采用超细水泥浅层注浆封堵渗水通道,辅以局部防水处理,阻断渗水来源,避免积水影响焊接与检修施工质量^[2]。(3)作业空间清理、安全防护设施布设。彻底清理刀盘周边渣土与废弃构件,规整狭小作业空间,保障人员通行与机具操作空间。依据受限空间规范,搭设临时防护设施与掌子面挡板,设置警示标识与应急逃生通道,配套消防及应急照明设备,有效规避狭小空间作业安全风险,保障施工安全。

2.2 常压开仓安全作业技术

(1)仓内通风、气体检测与环境达标控制。开仓前及作业期间持续开展洞内强制通风,置换仓内浑浊、有害气体,优化作业环境。严格落实气体常态化检测制度,重点监测瓦斯、一氧化碳、缺氧等关键指标,每间隔固定时段复测记录,确保仓内气体浓度完全符合安全施工标准,杜绝中毒、窒息、燃爆等安全风险。(2)常压开仓流程优化与风险防控措施。优化常压开仓施工工序,严格遵循“先加固、后开仓、再作业”的施工原则,简化冗余施工环节。作业全程实时监测掌子面围岩变形、渗水及结构稳定状态,建立隐患实时处置机制,针对围岩掉块、突发渗水等风险提前制定应急方案,实现开仓作业全过程动态风险管控。(3)小型机具、材料洞内转运布设技术。结合小直径隧道空间狭小、大型设备无法进场的特点,采用人工配合小型转运设备开展物料运输。提前分类整理刀具、螺栓、焊接材料、密封配件等施工物料,规划洞内转运路线,有序堆放机具与材料,规避物料杂乱堆积、机具占道问题,提升狭小空间物料转运效率,保障施工有序推进^[3]。

2.3 刀盘病害专项修复施工工艺

(1)磨损刀具拆除、更换与精准安装工艺。对磨损、崩齿、脱落的病害刀具逐一标记排查,采用专用工装拆除老旧刀具,彻底清理刀座内部渣土、锈蚀及杂物。严格匹配原厂规格刀具,采用对角分次紧固方式统一螺栓预紧力,精准控制刀具伸出高度、安装垂直度,确保刀具贴合紧密、固定牢固,杜绝松动偏移问题,保障后续掘进受力均衡。(2)刀盘面板开裂、变形焊接修复工艺。针对刀盘面板变形区域,采用机械校正工艺精准复位,消除结构形变。对裂纹缺陷区域打磨清理,去除疲劳损伤母材,采用分层对称焊接工艺修复,严控焊接温度与焊接速度,减少焊接应力集中,避免二次变形。焊后打磨焊缝表面,开展无损探伤检测,确保焊缝无气孔、夹渣、裂纹等缺陷,保障结构整体性^[4]。(3)

刀盘连接螺栓、密封系统检修更换工艺。全面排查刀盘所有连接螺栓,紧固松动构件,更换疲劳、滑丝、锈蚀的失效螺栓,统一扭矩标准并加装防松装置。对老化、磨损、渗水的密封组件全部更换,清理密封槽杂质,保证密封件贴合严密、安装到位,恢复刀盘仓体密封性能,杜绝后期渗水、进渣等病害问题。

2.4 修复后刀盘调试与复位技术

(1)刀盘平整度、同轴度检测校准。修复完成后采用精密检测仪器,对刀盘端面平整度、回转同轴度开展全面检测,对比施工标准核对参数。针对微小偏差精准校正调整,消除修复施工产生的结构误差,保证刀盘整体回转平稳,无偏心、抖动问题,满足掘进施工精度要求。(2)仓内设备复位、管线接驳调试。逐一完成仓内各类机具、防护设施、监测设备的复位安装,规整各类液压、电气管线,检查管线接驳牢固度、密封性,排查接线松动、管路渗漏等问题,确保所有设备、管线恢复正常工作状态,设备布局规整规范。(3)空载试运转与掘进适配性调试。设备复位校准后开展长时间空载试运转,观察刀盘回转、设备运行状态,排查异响、卡滞、抖动等异常问题。空载运行达标后,开展小幅低速试掘进调试,检验刀盘受力、掘进适配性,确认各项性能指标正常后,方可投入常态化掘进施工。

3 小直径TBM洞内常压刀盘修复施工质量控制与安全风险防控

3.1 修复施工质量控制标准

(1)刀具安装、焊接施工质量验收标准。刀具安装需保证型号匹配、定位准确,安装垂直度、伸出高度偏差控制在规范允许范围内,紧固螺栓预紧力均匀,防松装置完整到位,无松动、偏移隐患。焊接施工需满足无夹渣、气孔、裂纹等表面缺陷,焊缝成型均匀饱满,焊后通过无损探伤检测,内部质量达标,焊接强度与母材性能一致,杜绝虚焊、漏焊问题。(2)刀盘结构修复精度控制指标。刀盘修复后严格把控结构精度,端面平整度、回转同轴度需符合小直径TBM施工技术标准,校正后无明显形变、偏心误差。面板修复区域平整度偏差、焊缝高低差均控制在限定区间,刀盘整体回转平稳,无卡滞、抖动现象,确保掘进时受力均衡,避免出现刀具异常磨损、刀盘偏载等问题。(3)整体修复工程质量验收规范要求。整体修复工程需遵循隧道TBM施工质量验收规范,实行分项、分步验收制度。从前期预处理、专项修复到后期调试复位,各工序施工资料完整、工序衔接合规,修复后刀盘结构稳定、设备运行正常,病害彻底消除,各项性能指标满足后续常态化掘进施工要求。

3.2 关键工序质量控制措施

(1) 围岩加固与开仓作业质量管控要点。围岩加固前精准排查松散岩体及渗水区域, 严格把控注浆压力、注浆量和锚杆支护间距, 确保围岩加固密实稳定。常压开仓作业坚持实时监测围岩状态, 严格执行气体检测、通风除尘标准, 规范开仓工序, 杜绝违规作业, 从源头把控作业面施工质量。(2) 焊接修复、刀具安装精准控制措施。焊接作业采用分层对称焊接工艺, 严控焊接温度和焊接速度, 减少焊接应力与结构变形, 焊后及时做保温探伤处理。刀具安装前清理基座锈蚀与杂物, 采用对角紧固方式把控螺栓预紧力, 精准校准刀具安装位置, 保证所有刀具受力均匀、安装精度达标。(3) 调试复位阶段质量校核方法。设备复位后逐项核查管线、密封、支护设备的安装状态, 采用精密仪器检测刀盘平整度、同轴度等核心参数。通过空载低速运转、试掘进工况核验, 全面排查设备异响、抖动、渗漏等问题, 逐项校核修复质量, 确保各项参数符合掘进施工要求^[5]。

3.3 施工安全风险识别与防控

(1) 洞内有限空间作业风险识别与防控。小直径隧道属于狭小有限空间, 易存在有害气体积聚、缺氧、人员作业受限等风险。需全程持续通风, 定时检测气体浓度, 严禁违规作业, 配备应急救援设备与人员, 严控作业时长, 杜绝单人独立作业, 防范窒息、中毒安全事故。(2) 围岩坍塌、渗漏水安全隐患防控措施。施工全程监测掌子面围岩变形、裂隙发育情况, 发现岩体松动、掉块迹象及时补喷加固。针对渗漏水隐患, 提前注浆封堵, 作业中实时排查渗水通道, 做好排水引流, 避免积水浸泡围岩引发坍塌, 保障作业面整体安全稳定。(3) 动火作业、设备操作安全管控要点。洞内焊接等动火作业需办理专项动火手续, 清理周边易燃杂物, 配备灭火器材, 安排专人监护。设备操作人员需持证上岗, 严格遵循操作规程, 杜绝违规启停设备、超负荷作业, 规避设备故障、机械伤害等安全风险。

3.4 施工效率与成本优化措施

(1) 多工序交叉作业优化方案。结合狭小作业空间特点, 合理划分施工分区, 统筹排布围岩加固、刀具更换、焊接修复等工序, 规避工序冲突。合理调配施工人员, 实现分工协作、流水作业, 减少工序等待时间, 提升整体施工衔接效率。(2) 快速修复施工技术提质增效措施。采用标准化、模块化修复工艺, 提前备好刀具、密封件、螺栓等备用配件, 简化施工流程。运用精准校正、快速焊接修复技术, 减少返工整改次数, 在保障施工质量的前提下, 大幅缩短洞内修复工期。(3) 修复施工成本管控优化策略。严格管控材料耗材用量, 杜绝配件、焊接材料浪费, 合理调配小型机具与人力资源。提前排查病害隐患, 精准定位修复区域, 避免盲目施工造成资源损耗, 通过提质增效、减少返工, 有效降低洞内修复施工综合成本。

结束语

本文全面总结小直径TBM洞内常压刀盘修复整套施工技术, 明确刀盘病害成因与施工约束条件, 优化了围岩加固、焊接修复、刀具更换及设备调试等关键工艺, 建立完善的质量与安全管控体系。该技术有效适配小断面隧道受限施工场景, 降低作业安全风险, 提升修复效率、节约施工成本。研究成果可切实解决小直径TBM刀盘洞内修复难题, 对同类地下工程病害处置具有重要的工程应用与推广价值。

参考文献

- [1]周洋.小断面隧洞TBM常压刀盘积渣卡阻故障修复及优化措施[J].工程建设与设计,2022,12(15):156-158.
- [2]王鹏.小直径TBM刀盘洞内常压修复及换刀施工技术[J].铁道建筑技术,2022,6(8):112-115.
- [3]刘军,赵金明.复杂地层小直径TBM刀盘磨损机理及洞内快速修复工艺[J].现代隧道技术,2022,59(4):189-195.
- [4]陈玮.敞开式TBM刀盘螺栓异常损坏分析及修复[J].设备管理与维修,2024,9(12):45-47.
- [5]张宇,李建军.常压开仓条件下TBM刀盘局部破损洞内修复技术[J].四川水力发电,2023,42(2):78-81.