

基于TBM的地下油气管道隧道施工技术与创新研究

陈 烁

中石化石油工程设计有限公司 山东 东营 257000

摘要: 地下油气管道隧道施工对安全性、精度及环保性要求严苛,传统施工技术难以适配复杂地质与高效施工需求。本文结合TBM设备特性,系统研究其在地下油气管道隧道中的关键施工技术,涵盖机型选型、掘进优化、支护衬砌及管道协同施工等核心内容,重点探讨智能化、设备及特殊工况下的技术创新路径,为提升施工效率、保障工程质量、降低安全隐患提供技术支撑,助力地下油气管道隧道工程高质量发展。

关键词: TBM; 地下油气; 管道隧道; 施工技术; 创新

引言

随着油气能源输送需求提升,地下油气管道隧道工程数量激增,穿越地质条件愈发复杂,对施工技术的安全性、高效性和环保性提出更高要求。传统钻爆法存在掘进慢、精度低、风险高的弊端,难以满足工程需求。TBM作为全断面掘进核心设备,具有高效、精准、安全的优势,在隧道施工中应用广泛。基于此,本文聚焦TBM在地下油气管道隧道中的施工技术与创新,为工程实践提供理论与技术参考。

1 相关基础理论与TBM设备特性

1.1 地下油气管道隧道工程核心要求

(1) 工程地质与水文地质适配要求: 地下油气管道隧道穿越地层多样,需适配硬岩、软土、破碎带等不同地质条件,重点关注地质稳定性、围岩风化程度及地下水分布,避免因地质突变导致隧道坍塌、涌水等隐患,根据地质特性制定针对性掘进方案。(2) 施工安全与质量控制要求: 油气管道隧道核心需满足密封性和稳定性标准,杜绝油气泄漏风险,要求隧道衬砌强度达标、接缝密封严密;同时严控施工精度,确保管道铺设坡度、轴线偏差符合规范,保障后期管道安全运行。(3) 绿色施工与环保要求: 施工过程中需减少对周边生态环境和构筑物的扰动,控制施工扬尘、噪声污染,妥善处理弃渣,避免破坏地表植被和地下水资源,兼顾工程建设与生态保护。

1.2 TBM施工技术核心原理

(1) TBM全断面掘进核心机制: 采用刀盘旋转破岩,同步完成出渣、支护连续作业,通过推进系统提供掘进动力,实现隧道全断面一次成型,大幅提升掘进效率,减少工序衔接耗时。(2) TBM施工的力学特性: 掘进过程中需分析刀盘破岩受力、推进力与围岩反作用力的平衡关系,重点控制隧道轴线偏移和围岩变形,通过

实时监测调整掘进参数,保障施工稳定性。(3) TBM与油气管道隧道施工的适配性分析: 相较于传统钻爆法,TBM施工具有掘进速度快、施工精度高、安全性强的优势,可减少围岩扰动,降低瓦斯泄漏、坍塌等风险,更适配油气管道隧道的严苛要求^[1]。

1.3 地下油气管道隧道用TBM设备类型与特性

(1) 主流TBM机型分类: 硬岩TBM适用于坚硬岩层隧道;单/双护盾TBM适配破碎带、软岩地层,可同步完成支护;土压平衡/泥水平衡盾构机适用于富水软土地层,能有效控制涌水、沉降。(2) 核心部件功能特性: 刀盘需具备高强度耐磨性能,适配不同岩性破岩需求;推进系统需提供稳定动力,保障掘进匀速;支护系统需快速完成衬砌,提升隧道稳定性;通风防爆系统需满足油气隧道瓦斯防控要求。(3) TBM设备的针对性改造需求: 需适配油气管道隧道狭小空间,优化设备尺寸;增设瓦斯检测与防爆装置,强化安全防护;调整出渣系统,适配隧道施工弃渣处理需求,提升设备适配性。

2 基于TBM的地下油气管道隧道关键施工技术

2.1 TBM选型与针对性设计技术

(1) 选型原则与影响因素: TBM选型需严格遵循“适配性优先、安全性核心、经济性合理、高效性兼顾”的原则,核心影响因素涵盖工程地质与水文地质条件、隧道断面尺寸、埋深、工期要求及油气管道敷设标准五大方面。需全面结合地层岩性、地下水含量、瓦斯等有害气体分布情况,兼顾施工效率与成本控制,确保所选机型既能适配隧道施工工况,又能满足管道安装的空间、安全要求,避免因机型不适导致施工停滞、安全隐患或成本浪费。(2) 不同地质条件下的机型选型: 针对硬岩地层,优先选用硬岩TBM,其刀盘采用高强度耐磨材质,破岩能力强、掘进效率高,可适配高强度岩层的连续掘进需求;针对破碎地层,选用双护盾TBM,利

用护盾有效隔离围岩,减少坍塌风险,同步完成支护作业,提升施工安全性与连续性;针对富水软土地层,采用土压平衡或泥水平衡盾构机,通过精准控制舱内压力平衡地下水,有效抑制涌水、地表沉降,保护周边地质环境与建构筑物^[2]。(3)TBM针对性设计要点:空间优化方面,结合油气管道直径、敷设间距及检修需求,合理设计TBM机身尺寸与隧道断面,科学预留管道安装、检修操作空间,避免施工过程中TBM作业与管道安装相互干扰;有害气体防控设计方面,增设瓦斯等有害气体检测传感器、防爆通风系统,优化机身密封性能,防止有害气体泄漏,同时配备应急排风与防爆装置,全方位保障施工人员人身安全与施工安全。

2.2 TBM掘进施工核心技术

(1)掘进参数优化:根据现场实时地质反馈数据,动态调整刀盘转速、推进速度、推力等核心掘进参数,实现参数与地质条件的精准匹配。硬岩地层适当提高刀盘转速与推力,降低推进速度,减少刀具磨损,提升破岩效率;软岩或破碎地层放缓刀盘转速、减小推力,加快推进速度,避免围岩过度扰动引发坍塌;富水地层精准控制推进速度,配合泥浆支护工艺,平衡地层压力,杜绝涌水隐患。(2)长距离掘进保障技术:超前地质预报采用地质雷达、超前钻探、红外探测等综合手段,提前探测前方地层变化、地下水分布及有害气体含量,提前制定应对预案,规避施工风险;高效出渣采用皮带输送机与矿车联动模式,优化出渣路径,减少出渣拥堵,提升出渣效率;物料运输采用自动化输送系统,实现支护材料、刀具、耗材等物资的高效补给,保障TBM长距离连续掘进,避免工序脱节^[3]。(3)掘进精度控制:采用高精度激光导航系统实时监测TBM姿态,结合姿态传感器、位移传感器反馈数据,及时调整推进方向与高程,确保隧道轴线偏差控制在规范允许范围内;针对长距离掘进易出现的轴线偏移问题,定期进行姿态校准,优化推进参数,兼顾隧道轴线精度与后续管道敷设要求,为管道精准安装奠定坚实基础。

2.3 隧道支护与衬砌施工技术

(1)管片衬砌设计与拼装技术:管片结构采用高强度、高抗渗混凝土材质,适配油气管道隧道的密封性与长期稳定性要求,管片接缝处增设高性能防水密封垫,优化接缝结构设计,杜绝渗水、漏气隐患;拼装过程中采用自动化拼装设备,精准控制拼装精度,避免管片错台、破损,确保衬砌整体强度与密封性,同时预留管道安装接口与检修通道,方便后续管道敷设与维护。(2)同步注浆与二次注浆技术:同步注浆在管片拼装完成后

立即开展,采用高强度、微膨胀注浆材料,精准控制注浆压力与注浆量,快速填充管片与围岩之间的间隙,防止围岩沉降与管片变形;针对注浆不密实、存在空隙的区域,及时采用二次注浆补强,优化注浆工艺,确保间隙填充饱满,进一步提升衬砌防水、抗渗性能,保障隧道长期稳定运行。(3)特殊段支护技术:针对断层破碎带,采用“超前小导管注浆加固+钢拱架支护+钢筋网铺设”的强化方案,提前加固围岩,提高围岩整体性,防止坍塌;针对高压富水区,增设止水帷幕,采用抗高压、高抗渗注浆材料,强化衬砌防水结构,严控涌水风险;施工过程中实时监测围岩变形数据,动态调整支护参数,确保特殊段施工安全与质量^[4]。

2.4 管道敷设与隧道协同施工技术

(1)隧道内管道运输与吊装技术:结合TBM掘进节奏,采用轨道式运输小车输送管道,规划专属运输路线,避免与TBM掘进、支护作业交叉干扰;吊装采用小型龙门吊或电动葫芦,精准控制吊装速度与角度,防止管道碰撞损坏,同时优化吊装点位与作业流程,确保管道运输与吊装安全高效,与TBM连续掘进节奏保持同步,提升整体施工效率。(2)管道对接与密封施工技术:管道对接采用全自动焊接工艺,严格控制焊接参数,焊接完成后进行无损检测,确保焊接质量达标;密封施工采用高性能、耐老化密封材料,优化密封结构设计,满足油气输送的高密封性与长期耐久性要求,杜绝油气泄漏隐患;对接与密封完成后,及时进行压力试验,全面检验密封效果,确保管道运行安全。(3)施工工序协同优化:建立TBM掘进、隧道支护与管道敷设的协同管控机制,合理规划各工序衔接时间,避免交叉作业干扰;采用信息化管理系统,实时反馈各工序施工进度、质量数据,动态调整施工计划,确保TBM掘进、支护完成后,管道敷设能及时跟进,实现各工序无缝衔接,提升整体施工效率,缩短总工期。

3 基于TBM的地下油气管道隧道施工技术创新

3.1 智能化施工技术创新

(1)智能掘进与决策系统:整合TBM施工过程中的地质数据、设备运行参数,构建大数据分析平台,结合AI算法实现掘进参数自调整,可根据实时地质变化自动优化刀盘转速、推进速度等核心参数,提升掘进效率与安全性。同时嵌入故障预警模块,通过监测设备振动、温度等指标,提前预判刀具磨损、液压系统故障等问题,发出预警信号并给出处置建议,减少施工停滞时间。(2)数字化管控技术:引入BIM技术实现隧道施工全生命周期管理,从设计、施工到运维全程建模,清

晰呈现隧道结构、管道敷设位置及设备布局。搭建可视化监控平台,整合现场摄像头、传感器数据,实时展示掘进进度、围岩变形、有害气体浓度等信息,实现施工过程透明化、可追溯,便于管理人员精准管控施工质量与安全。(3)高精度导向技术创新:突破传统激光导航局限,采用惯性导航与全站仪结合的复合定位方式,惯性导航实现隧道内无信号盲区定位,全站仪负责实时校准,有效提升长距离、曲线段掘进的定位精度,将隧道轴线偏差控制在毫米级,确保与管道敷设要求高度契合,减少后期调整工作量。

3.2 TBM设备技术创新

(1)可变径与模块化TBM研发:针对地下油气管道隧道断面多变、地质复杂的特点,研发可变径TBM设备,可根据隧道断面需求灵活调整刀盘直径,适配不同段位施工需求。采用模块化设计,将机身拆解为多个单元,便于运输、组装及后期改造,同时可快速切换护盾、刀盘等部件,适配地质条件的动态变化,提升设备通用性。(2)新型破岩技术探索:开展高压水射流、激光辅助破岩技术研究与应用,在硬岩地层中,通过高压水射流预先切割岩体、降低岩体强度,配合刀盘破岩,减少刀具磨损、提升破岩效率;激光辅助破岩则利用高温熔化岩体表层,降低破岩阻力,尤其适用于坚硬、耐磨地层,进一步优化掘进效果^[5]。(3)设备节能与环保改造:聚焦绿色施工需求,创新渣土资源化利用技术,将掘进产生的渣土经破碎、筛分后,用于隧道回填、路基铺设等,减少弃渣污染。研发设备能源回收系统,回收TBM推进、制动过程中产生的多余能量,转化为设备运行动力,降低电能消耗,同时优化设备尾气、噪声处理装置,实现节能与环保双赢。

3.3 特殊工况施工技术创新

(1)复杂地质适应性创新:针对岩爆、断层错动等复杂地质风险,研发针对性防控技术,在岩爆高发段,采用超前钻孔卸压、喷洒柔性防护材料等措施,释放岩体应力,减少岩爆危害;针对断层错动区域,优化TBM

护盾结构,采用可伸缩、抗变形设计,配合超前注浆加固围岩,确保隧道结构稳定,避免断层活动对施工造成影响。(2)长距离与深部隧道施工创新:针对长距离、深部隧道通风降温难题,创新采用分区通风、智能温控系统,结合冰冷却技术降低隧道内温度,改善施工环境;优化设备维保方案,采用远程监测、在线检修技术,在TBM掘进间隙完成核心部件检修,减少停机维保时间,保障长距离掘进连续性。(3)生态敏感区施工创新:围绕生态敏感区低扰动、零污染要求,改进施工技术,采用低噪声、低振动TBM设备,优化掘进参数减少围岩扰动,避免破坏地表植被。创新废水、废渣处理工艺,施工废水经处理后循环利用,废渣全部资源化处置,杜绝环境污染,实现工程建设与生态保护协同发展。

结束语

本文围绕基于TBM的地下油气管道隧道施工技术与创新展开研究,明确了TBM选型、掘进、支护及协同施工的关键要点,提出了智能化、设备模块化及特殊工况适配等创新方案,有效解决了复杂地质下施工效率与安全管控的核心难题。后续需结合工程实际持续优化技术参数,推动TBM技术与油气管道隧道施工深度融合,助力油气能源输送基础设施建设迈向高效、安全、绿色发展新阶段。

参考文献

- [1]洪梅.绿色环保理念下油气管道施工技术探析[J].建筑技术科学,2024,(8):95-97.
- [2]安朋亮.基于BIM技术的油气管道隧道设计与施工管理研究[J].建筑设计及理论,2025,(10):132-134.
- [3]张伟.基于BIM的油气管道隧道施工质量保障机制研究[J].工程管理评论,2025,47(6):18-27.
- [4]刘芳.BIM技术在隧道风险识别与控制中的应用[J].岩土工程学报,2025,41(7):27-36.
- [5]王志彬.BIM技术与绿色施工理念在油气管道隧道中的融合[J].可持续发展研究,2025,46(8):19-29.