

天然气管道穿越河流施工方法比选与安全控制策略

徐毓霖

靖江天力燃气有限公司 江苏 靖江 214500

摘要:天然气管道穿越河流施工需综合考量地质、水文、环境及经济因素,合理选择施工方法并制定科学的安全控制策略。本文分析了天然气管道穿越河流施工方法比选,涉及技术适应性对比、经济性对比、施工风险对比等方面,提出了基于地质勘察、设备选型、施工监测及应急响应的全周期安全控制框架,以有效降低施工事故率,保障管道全生命周期安全运行。

关键词:天然气管道;穿越河流;施工方法;安全控制

引言

随着全球能源结构转型,天然气作为清洁能源的需求持续增长,管道运输因其高效、安全的特点成为天然气输送的主要方式。然而,河流穿越段因地质条件复杂、水文环境多变,成为管道施工中的高风险环节。施工方法选择不当或安全控制措施缺失,不仅可能导致工程延期与成本超支,更可能引发天然气泄漏、环境污染等次生灾害,威胁周边居民生命财产安全。因此,如何根据河流特性优化施工方案,并构建覆盖设计、施工、运维全周期的安全控制体系,成为行业亟待解决的关键问题。

1 天然气管道穿越河流施工方法比选

1.1 技术适应性对比

(1)地质条件方面,定向钻穿越法凭借其灵活的钻进能力,可适应从软土到中硬岩层的广泛地质环境,通过调整钻头类型和泥浆配方,能够有效应对黏土、砂层甚至风化岩层,但对未固结的流沙层或大粒径漂石需谨慎处理,避免卡钻风险。顶管法依赖顶进设备将管道逐节顶入地层,其适用性受限于顶进力传递效率,在软土或中等密实度的砂层中表现良好,但若遇到大粒径砂卵石层,因顶进阻力骤增且易导致管节偏移,需通过预处理或改用其他方法规避风险^[1]。沉管法则对河床稳定性要求较高,需确保管道沉放过程中河床无剧烈冲刷或塌陷,因此更适用于基岩裸露、覆盖层薄且地质均匀的河段,若河床存在软土夹层或活动断层,需通过抛石基床或桩基加固来增强稳定性。(2)水文条件对施工窗口期的选择具有决定性影响。开挖法需直接开挖河床,施工期间需完全截断水流,因此受洪水威胁显著,仅适用于枯水期较长、流量稳定的河流,且需设置围堰和排水系统,若遇突发洪水可能导致管沟冲毁或管道漂浮。定向钻和顶管法通过非开挖方式穿越河床,施工过程不阻断水流,可灵活选择汛期外的时间段作业,但需关注地下水位变化,

避免因水位上升导致泥浆稀释或顶进阻力增加。(3)环保要求是现代工程不可忽视的约束条件。定向钻和顶管法因无需开挖河床,对地表生态和水生生物的干扰最小,尤其适用于生态敏感区或饮用水源保护区,但定向钻的泥浆排放需严格控制,避免污染水体;顶管法的顶进过程可能引发局部地面沉降,需通过跟踪注浆补偿地层损失。

1.2 经济性对比

(1)设备投入方面,定向钻穿越法因需配备高性能钻机、导向系统及泥浆循环设备,其初始投资显著高于其他方法,尤其在大口径、长距离穿越项目中,设备成本占比可达总投资的40%以上;顶管法需顶进设备、中继环及注浆系统,设备费用次之;沉管法虽需预制管道、浮运驳船及沉放装置,但部分设备可重复利用,整体投入略低于顶管法;开挖法则仅需常规挖掘机、围堰材料及排水设备,设备成本最低,但受限于适用条件,仅在小规模工程中具有经济优势。(2)工期效率直接影响间接成本,沉管法因需管道预制、基础处理及水下对接等复杂工序,施工周期最长,通常需6-12个月,且受水文条件限制严格,延误风险高。定向钻法通过非开挖方式缩短作业面,钻进、扩孔与回拖可连续进行,工期控制在3-6个月,但地质复杂时需反复调整参数,可能延长工期。顶管法需逐节顶进管道,单日进度受顶进力与地层阻力影响,一般工期为4-8个月,若采用土压平衡或泥水平衡技术可提升效率。开挖法虽施工直观,但需依赖枯水期窗口,且管沟开挖、回填及河道恢复耗时较长,整体工期与顶管法接近,但在地质简单、水文稳定的条件下可能缩短至3个月以内。(3)后期维护成本是长期经济性的关键指标,开挖法因直接暴露管道于河床,易受水流冲刷、船锚撞击及地质沉降影响,需定期检测防腐层、加固管基及修复变形,维护费用占全生命周期成本的20%-30%^[2]。定向钻法管道埋深大且受地层包裹,抗外

力能力强,维护主要针对焊缝检测与阴极保护,成本占比约10%-15%。顶管法管道位于顶进通道内,虽受地层约束但可能因地面荷载导致局部沉降,需监测管道应力及接口密封性,维护成本与定向钻法相近。沉管法管道沉放于河床基床,稳定性高,但需防范基床冲刷及锚固失效,维护重点在于水下结构检测与稳管措施加固,成本占比约15%-20%。

1.3 施工风险对比

在天然气管道穿越河流的施工风险评估中,不同方法因工艺特性差异呈现显著的风险分布特征。(1)开挖法作为直接暴露作业方式,其核心风险源于地质与水文条件的双重挑战。河床地层若存在软土、流沙或地下水位较高的情况,管沟开挖时易引发局部塌方,导致作业面坍塌或设备掩埋;洪水冲刷是开挖法的另一致命风险,施工期间若遇突发洪水,围堰可能被冲毁,未回填的管沟会迅速积水,导致管道漂浮或移位,甚至引发整体工程失效。(2)定向钻法风险集中于钻进过程与管道保护环节,地层非均质性是导致钻进偏差的主要因素,若钻头穿越软硬交错地层时未及时调整推进参数,轨迹可能偏离设计轴线,引发管道无法回拖或穿越长度不足^[3]。卡钻风险多由地层中孤石、树根等障碍物引发,钻头被卡后需反复提钻、旋转或爆破处理,不仅延误工期,还可能造成钻杆断裂。防腐层损伤则源于钻进过程中泥浆冲刷、钻杆摩擦或回拖时与孔壁刮擦,若防腐层破损未及时修复,管道投运后易因电化学腐蚀导致泄漏。(3)顶管法的风险与顶进力学控制密切相关,顶进力不足可能因地层阻力过大或设备功率不足引发,导致顶进停滞甚至管道反涌。管节错位多由顶进方向偏差或接口密封失效造成,若未及时校正,错位累积会引发管道弯曲或断裂。(4)沉管法的风险贯穿浮运、沉放与对接全流程,浮运失控可能因拖轮动力不足、缆绳断裂或水流突变引发,导致管道偏离航道或撞击桥墩。沉放偏移多由水流冲刷、基床不平整或沉放速度过快造成,管道落床后若轴线偏差超标,需重新浮运调整,成本高昂。水下对接是沉管法的技术难点,对接装置精度不足或水流扰动过大时,管端可能无法精准对接,导致密封失效或连接结构损坏,需潜水员水下作业修复,安全风险极高。

2 天然气管道穿越河流安全控制策略

2.1 施工前安全控制

(1)在天然气管道穿越河流工程的施工前安全控制中,地质与水文勘察是风险预控的基础环节。需综合运用地质雷达扫描、钻探取样及原位测试等技术手段,对河床地层结构进行精细化探测,同时测定地下水位动态

变化规律及历史洪水水位数据,为后续设计提供准确的地质输入条件。在此基础上,通过三维地质建模软件构建河床地层空间模型,直观呈现地层起伏、软硬夹层及潜在地质灾害的分布特征,结合水流冲刷模拟分析施工扰动下河床的稳定性变化,识别可能引发塌方、管基失稳的高风险区域,为设计优化提供科学依据。(2)设计优化与风险评估阶段需紧扣管道本体安全与施工过程安全双重目标,根据管道设计压力、管径尺寸及埋深要求,通过理论计算与经验公式校核管道在极端工况下的抗浮稳定性,确保管道自重与覆土重量之和大于地下水浮力^[4]。针对不同施工方法的技术特点,采用有限元分析技术模拟施工全流程,定向钻法需重点分析钻进过程中地层非均质性导致的轨迹偏移风险;顶管法需评估顶进力突变引发的管节错位或地面沉降;沉管法则需关注沉放过程中水流冲刷对管道轴线的影 响,通过多工况模拟识别应力集中区域与变形超标节点,为制定针对性控制措施提供数据支撑。(3)设备与材料选型是保障施工安全的物质基础,管道材质需兼顾强度与耐腐蚀性,优先选用X80级高强度钢或钢塑复合材料,通过增加壁厚10%-15%提升管道抗外压能力,并降低施工损伤导致的强度折减风险。防腐措施需匹配施工方法特性,定向钻法因钻进过程中管道与地层摩擦剧烈,采用环氧玻璃钢防护层增强耐磨性,沉管法因管道长期浸没于水中,通过牺牲阳极阴极保护系统抑制电化学腐蚀,确保管道全生命周期安全运行。

2.2 施工中安全控制

(1)开挖法需重点防范管沟塌方与洪水侵袭,围堰设计应采用双排钢板桩结构,通过钢桩间锁口连接形成封闭防渗体系,配套设置大功率排水泵站,根据实时水位监测数据动态调整排水量,确保围堰内水位始终低于开挖面0.5米以上;对于深度超过5米的管沟,需根据地层条件选择钢板桩或土钉墙支护,钢板桩通过振动锤打入地层形成连续挡土墙,土钉墙则通过钢筋土钉与喷射混凝土面层结合,有效约束土体变形,同时设置坡顶截水沟与坡面防护网,防止地表水渗入引发塌方。(2)定向钻法施工安全核心在于轨迹控制与孔壁稳定,导向系统需集成陀螺仪与GPS双定位技术,陀螺仪通过测量钻头姿态角实现三维空间定位,GPS则通过地面参考站修正钻进偏差,两者数据融合后实时反馈至控制台,确保钻进轨迹偏差控制在 ± 0.5 米以内。泥浆管理需根据地层特性动态调整配方,在砂层中增加膨润土含量提升泥浆黏度,形成致密泥皮防止塌孔,在岩层中添加聚合物增强携渣能力,避免钻屑堆积卡钻。(3)顶管法施工安全需强化顶

进力监测与摩擦控制,顶进管道前端安装高精度压力传感器,实时监测顶进力变化,当压力突增时自动触发报警并暂停顶进,避免管节因超载破裂。管道外壁涂抹膨润土基润滑剂,通过泥浆泵持续注入顶进通道,在管道与地层间形成润滑膜,将摩擦系数降低至0.1以下。(3)沉管法施工安全关键在于浮运稳定性与水下对接精度,浮运阶段采用多艘全回转拖轮协同作业,通过GPS定位系统与张力监测装置实时调整拖航速度与方向,确保管道浮运轨迹偏差不超过设计轴线 ± 1 米。沉放对接时使用水下机器人搭载高清摄像头与激光导向装置,辅助操作人员精准控制管道沉放姿态,对接过程中通过液压千斤顶微调管端位置,确保对接偏差控制在 ± 10 厘米以内。

2.3 施工后安全控制

(1)管道检测与验收是保障运行安全的首道防线,需采用智能内检测器(ILI)对管道进行全线扫描,该设备搭载电磁超声、涡流等多传感器,可精准识别焊缝未熔合、裂纹等结构性缺陷。水压试验是验证管道密封性的关键环节,需向管道内注入清洁水并逐步升压至设计压力的1.5倍,保压24小时期间持续监测压力变化,若压降不超过0.6%且无渗漏现象,方可判定为合格,试验后需彻底排空管道并干燥处理,防止内壁腐蚀。(2)生态修复与监测是履行环境责任的重要举措,河床回填需采用分层压实工艺,每层填土厚度控制在0.3米以内,通过振动压路机往返碾压确保压实度达到95%以上^[5]。恢复河床原始地貌后,根据流域生态特征种植芦苇、香蒲等本土水生植物,通过植物根系固土作用增强边坡稳定性,同时为水生生物提供栖息环境。此外,长期监测体系需覆盖管道全生命周期,在管道轴线两侧50米范围内设置位移监测桩,通过全站仪每月测量管道水平位移,在河床易冲刷段布置声呐多普勒剖面仪,实时监测流速与冲刷深度。(3)应急预案与演练是应对突发事件的核心保障,

需根据风险评估结果制定分级响应机制,明确泄漏、塌方、洪水等事故的初期处置、扩大应急及恢复重建流程,预案中需细化人员疏散路线、物资调配方案及跨部门协作机制。每半年组织一次全要素应急演练,模拟管道泄漏场景时,重点训练潜水员水下封堵、机械卡具快速安装等技能,演练后通过复盘评估修订预案缺陷,并建立应急资源动态管理平台,实时更新抢险设备、防护用品及医疗物资的库存与位置信息,确保事故发生后30分钟内调集所需资源,最大限度降低事故影响。

结语

综上所述,天然气管道穿越河流施工是集技术、管理、环境于一体的系统性工程,其安全性直接关系到能源供应稳定与生态环境保护。在地质条件复杂、环保要求高的区域,定向钻法与顶管法凭借非开挖、低扰动的特性成为首选;而在河床稳定、施工空间充足的场景,开挖法与沉管法仍具有成本优势。安全控制方面,通过实时监测管道位移、泥浆性能、地质变化等关键参数,实现风险动态管控。未来,随着物联网、大数据等技术的深度应用,天然气管道穿越河流施工将向智能化、精细化方向发展,进一步降低安全风险,提升工程综合效益。

参考文献:

- [1]沈肖肖.新建铁路穿越既有高速铁路节点方案研究[J].工程技术研究,2022,7(07):200-203.
- [2]徐龙春.燃气管道穿越铁路施工安全技术问题及对策[J].煤气与热力,2021,41(08):34-36+46.
- [3]王国鹏,李俊杰.河流穿越施工技术在天然气管道中的应用研究[J].建设科技,2021,42(4):88-94.
- [4]刘华.石油天然气管道储运的安全管理探讨[J].石化技术,2023,30(08):135-137.
- [5]高峰,李文斌.石油天然气管道施工建设质量管理措施[J].石油化工建设,2022,44(12):193-195.