

Discussion on Protection Measures of Long-distance Oil and Gas Pipeline Construction Period under Complex Geological Conditions

Lei Zhang Jing Tang Zhen Wang Haitao Wang Yibo Xiao

China National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Central China Branch, Wuhan, Hubei, 430000, China

Abstract

Long-distance oil and gas pipeline projects frequently traverse complex geological zones including landslides, karst formations, and permafrost. During construction, geological hazards may trigger pipeline deformation or fractures, posing direct risks to both engineering quality and operational stability. This study identifies multiple critical risks under complex geological conditions, such as mechanical damage from geological disasters, structural failure due to uneven foundation settlement, and human-induced damage from improper construction techniques. Targeted protective measures are proposed through geological pre-treatment, optimized construction methods, and early warning monitoring systems. Case validation demonstrates that after implementing these measures, the slope displacement during the initial construction phase showed a slight increase but stabilized later, with a maximum cumulative displacement of 18.5mm. This provides valuable technical references for similar projects.

Keywords

complex geology; long-distance oil and gas pipeline; construction period; protective measures; monitoring and early warning

复杂地质条件下长输油气管道施工期保护措施探讨

张雷 唐静 王振 王海涛 肖易博

国家石油天然气管网集团有限公司华中分公司, 中国·湖北武汉 430000

摘要

长输油气管道工程常穿过滑坡、岩溶、冻土等复杂地质区域, 施工期地质灾害容易引发管道变形、破裂之类的安全隐患, 直接危及工程建设质量与后期运营稳定性。本文结合复杂地质条件类型及特点, 施工期管道面临多种主要风险, 像地质灾害引发机械性损伤、地基不均匀沉降致使结构失效、施工工艺不当造成人为破坏等, 需进行分析, 从地质预处理、施工工艺优化、监测预警体系构建这些方面给出针对性的保护措施。凭借工程实例验证措施有效性, 该案例工程实施上述保护措施后, 施工前期边坡位移小幅上升, 后期变得稳定, 最大累计偏移数值18.5mm, 给同类工程供应技术参照。

关键词

复杂地质; 长输油气管道; 施工期; 保护措施; 监测预警

1 引言

长输油气管道是能源输送核心设施, 其建设范围包含山地、丘陵、沼泽等多种复杂地貌类型, 地质条件的不确定, 让施工期管道保护难度大增^[1]。部分管道施工事故和地质灾害有直接关联, 因滑坡、泥石流而产生的管道移位, 占比较大, 传统施工保护措施面临针对性不足、监测滞后这类问题, 难以跟上复杂地质环境的动态变化^[2]。研究复杂地质条件下管道施工期的保护措施, 对提高工程抗风险能力、保证能源安全输送意义重大。

2 复杂地质条件的类型及对管道施工的影响

2.1 复杂地质条件的主要类型

长输油气管道穿越的复杂地质类型可分成构造破碎带地质、岩溶发育地质、冻土地质、滑坡与泥石流易发地质 4 大类, 各类地质的分布特征及工程特性如表 1 所示。

2.2 复杂地质对管道施工的影响机制

复杂地质条件对管道施工的影响, 关键在地基稳定性、管道结构完整性、施工工艺适配性等三个层面。以岩溶地质为例, 管道地基承载力不均因溶洞随机分布, 倘若未预处理便径直铺设管道, 运行时荷载作用容易造成管道局部应力集中, 接着出现裂痕; 冻土地质的冻融循环会让土体出现冻胀与融沉变形, 直接让管道产生轴向位移, 损害管道接口密封性。复杂地质区域一般交通不畅, 大型施工设备进场遇难题, 传统开挖技术效率欠佳, 进一步延长了施工期管道暴露的风险时长。

【作者简介】张雷 (1981—), 男, 中国辽宁丹东人, 本科, 助理工程师, 从事理地长输油气管道保护研究。

表 1 长输油气管道穿越的复杂地质类型及工程特性

地质类型	分布区域	核心工程特性	施工风险点
构造破碎带地质	板块交界带、山区褶皱带	岩体破碎、节理发育，力学稳定性差	基坑坍塌、边坡失稳，管道基础不均匀沉降
岩溶发育地质	碳酸盐岩分布区	溶洞、溶蚀裂隙发育，地下水位波动大	地基空洞塌陷，管道悬空变形
冻土地质	高纬度、高海拔地区	冻融循环作用显著，土体强度随温度变化剧烈	冻土融化导致地基沉降，管道拉伸断裂
滑坡泥石流地质	山区、丘陵区冲沟地带	土体含水量高、坡度陡峭，易受降雨诱发	滑坡体推移管道移位，泥石流冲毁施工设施

3 施工期管道面临的主要风险

3.1 地质灾害引发的机械性损伤

滑坡、泥石流等突发地质灾害是施工期管道的主要威胁。因滑坡体作用，管道承受持续的侧向推力，当推力超出管道屈服强度，管道将产生塑性变形甚至发生断裂；泥石流裹挟石块、土体对管道及施工支架进行冲击，引发管道外壁有划痕、防腐层发生破损，埋下后期腐蚀的隐患^[9]。

3.2 地基不均匀沉降导致的结构失效

复杂地质区域地基土，物理力学性质差别大，施工阶段基坑开挖、降水等作业会进一步干扰土体平衡，造成地基沉降不均匀。沉降差一旦超过管道允许变形量，管道接口焊缝会出现疲劳裂纹，严重情况下焊缝发生开裂，造成油气泄漏现象。岩溶地质区的空洞塌陷会让管道直接悬空，外部荷载与自身重量作用下的悬空段管道，极易产生屈曲失稳现象。

3.3 施工工艺不当造成的人为破坏

面对复杂的地质状况，若施工工艺选取不合理，会增加管道受损风险。在冻土区域应用传统开挖工艺，会损害冻土的热平衡，让冻土加速融化^[4]；在构造破碎带进行爆破施工的时候，爆破冲击波给管道带来振动荷载，影响到管道焊缝质量。施工机械操作出错会导致管道碰撞、挤压，施工事故里这类人为破坏占比较大。

4 复杂地质条件下管道施工期保护措施

4.1 地质预处理措施

在管道施工前，要针对复杂地质区域做专门预处理，排除或降低地质隐患。针对浅层滑坡，采用抗滑桩和截排水系统一起加固方案^[5]。抗滑桩扎进稳定岩层，间距设定为 5 - 8m，用钢筋混凝土浇筑桩体；截排水系统由截水沟与盲沟构成，滑坡体后缘设有截水沟，盲沟被埋进滑坡体内，切实减少土体含水量，增强边坡稳固性。针对深层滑坡，可采用预应力锚索来加固，锚索锚固段长度最少 8m，滑坡推力决

定预应力值的大小。采用注浆充填加换填垫层的手段处理溶洞。直径不足 3m 的小型溶洞，采用水泥砂浆进行注浆充填，把注浆压力控制在 0.5 - 1.0MPa；针对直径 ≥3m 的大型溶洞，先填充碎石，再次灌注混凝土，筑牢稳定根基。于管道下方安置级配砂石垫层，厚度最少 0.5m，使地基承载力均匀性提高。冻土地区施工时，采取保温棚加隔热层的组合办法。保温棚搭建用钢结构骨架和阻燃保温布，棚子里安了温控系统，让温度维持在 0℃以下；管道下方敷设聚氨酯隔热层，厚度最少 10cm，减少外界热量进到冻土层。施工尽量安排在冬季冻土稳定阶段实施，避免夏季冻融期对土体的扰动。

4.2 施工工艺优化措施

不同复杂地质情形，改良施工工艺，降低施工对管道及地质环境的干扰。针对滑坡、岩溶等地质敏感区域而言，优先采用定向钻穿越及顶管施工工艺。利用定向钻穿越能实现管道地下铺设，不用大范围开挖，防止边坡稳定性受损；顶管施工适合浅埋管道穿越，借助顶管机把管道顶进地层，减少对土体的扰动。如输油管道工程穿越岩溶发育区时，采用定向钻这种施工工艺，管道敷设完成以后，把地基沉降差控制到 5mm 以内，大幅低于规范允许数值。将复杂地质区域的管道分成多个施工段落，每段长度控制在 100-200m，一段完成后即刻着手进行地基加固与管道回填，防止管道长时间裸露。施工期间依据地质监测数值调整工艺参数，以在冻土区域开展的开挖为例，若监测到冻土温度上升，马上终止施工，运用保温手段。管道出厂前涂三层 PE 防腐层，厚度不低于 2.5mm；施工进程里，用聚乙烯防腐胶带缠绕管道外壁，提升防腐成效。针对穿越滑坡、泥石流区域的管道，给保护层加上混凝土包覆，包覆厚度要达到 10cm 及以上，增强管道抗冲击水平。

4.3 施工期监测预警体系构建

建立地质 - 管道 - 环境三位一体式监测预警体系，实时掌控施工期地质和管道情况，具体监测内容及方法如表 2 所示。

无线传输系统实时把监测数据上传到监控中心，把阈

表 2 施工期监测预警体系监测内容及方法

监测类别	监测指标	监测方法	预警阈值
地质监测	边坡位移、土体沉降、地下水位	全站仪、沉降计、水位计	边坡日位移 > 5mm，土体沉降速率 > 2mm/d
管道监测	管道变形、焊缝应力、防腐层完整性	应变片、超声探伤仪、防腐层检漏仪	管道变形量 > 3mm，焊缝应力 > 150MPa
环境监测	降雨量、气温、冻土温度	雨量计、温度计、冻土温度传感器	日降雨量 > 100mm，冻土温度 > 0℃持续 24h

值预警与趋势预警相结合,监测数据达到预警阈值时出现异常变化趋势时,即刻发出预警信号,实施应急处置预案。在工地设置应急物资储备点,筹备沙袋、抗滑桩、应急堵漏器材之类物资,保障突发状况下能快速应对。

4.4 施工管理措施

面向复杂地质区域,制定专项施工方案,把施工流程、技术参数、安全措施弄明确,专家论证通过方案后才可实施^[6]。施工人员参与复杂地质施工技术及安全培训,主要讲解地质灾害识别与应急处置手段,考核合格方可进行上岗作业。聘请专业监理单位全程监督施工过程,严格把关地质预处理、管道敷设、监测数据等相关内容,让施工质量合乎规范规定。

5 工程实例分析

以中亚天然气管道某一段工程为例,该段管道穿过天山山脉滑坡与冻土复合地质区域,管径 1219mm,设计压力值为 10MPa。施工前通过抗滑桩及预应力锚索加固滑坡体,一共设置了 52 根抗滑桩,桩 25m;冻土区用保温棚加聚氨酯隔热层做保温,施工的时候运用定向钻穿越工艺,同步实施地质-管道-环境监测工作。施工阶段监测数据显示,边坡最大日位移值 2.3mm,管道变形量 1.8mm,全都比预警阈值低。管道敷设结束,以超声探伤进行检测,焊缝合格比例为 100%。工程实施 3 年后进行回访,管道运行态势佳,变形、泄漏等问题未曾出现,证实了本文提出的保护措施有效。该案例工程边坡位移在施工前期小幅增长,后期趋于稳定,最大累计位移 18.5mm。

6 结语

复杂地质条件下的长输油气管道施工阶段,主要风险涵盖地质灾害引起的机械性损伤、地基不均匀沉降带来的结构失效、施工工艺不当造成的人为破坏,应从地质预处理、工艺优化、监测预警、施工管理等方面打造综合保护体系。针对性地质预处理手段可有效去除地质隐患,非开挖施工技术能明显减轻对地质环境的扰动,三位一体的监测预警体系可做到风险早发现、早处理。综合保护措施的有效性被工程实例证实,可为同类复杂地质管道工程给予技术借鉴。长输油气管道往更复杂地质区域伸展,未来可进一步研究智能化监测技术和新型防护材料。运用物联网、大数据技术构建起智能监测平台,做到监测数据的自动分析及预警;研发高硬度、耐侵蚀的管道防护材料,提高管道在复杂地质环境下的长久性。

参考文献

- [1] 段瑞峰.油气长输管道防腐施工质量关键控制措施研究[J].石油和化工设备,2025,28(08):233-235.
- [2] 刘皎果.油气管道施工工艺优选与安装工程控制研究[J].石油和化工设备,2025,28(06):136-138.
- [3] 曲智超,张世彬,李雷,等.浅谈油气管道工程施工与高原生态环境保护对策[J].油气田地面工程,2024,43(03):58-63.
- [4] 段含斌.基于第三方施工的长输油气管道保护方案研究[J].化工管理,2022,(13):161-168.
- [5] 李未晚,寇小平.长输(油气)管道安全隐患分析[J].大众标准化,2020,(17):173-174.
- [6] 冉伟.长输油气管道安全隐患及管理措施研究[J].石化技术,2020,27(03):293+295.