

Risk assessment and protection reinforcement technology for geological hazard sections of long-distance oil and gas pipelines

Yihui Wu Yaguang Cui

Xi'an Oil and Gas Transportation Branch Northwest Pipeline Company, State Pipeline Network, Xi'an, Shaanxi, 710018, China

Abstract

China's long-distance oil and gas pipelines often pass through complex geological conditions such as mountainous areas, loess areas, and karst areas. Geological disasters such as landslides, loess subsidence, and mudslides occur frequently, seriously threatening the safety of pipeline operation and the stable supply of oil and gas resources. In order to carry out risk assessment of pipelines in areas prone to geological disasters and improve the efficiency of pipeline disaster prevention and reinforcement, this article combines field geological surveys, comprehensively uses monitoring and numerical analysis methods, constructs a pipeline risk management system in disaster prone areas, analyzes the failure modes of pipelines under various geological disasters, and studies supporting disaster prevention and reinforcement technologies. The research results can be used for identifying and assessing the risk level of geological hazards in long-distance oil and gas pipelines, providing efficient technical means to reduce pipeline operation risks, ensuring safe and stable pipeline operation, and providing technical ideas for risk control and governance of geological hazards in long-distance oil and gas pipelines.

Keywords

Long-distance oil and gas pipelines; Geological hazards; Risk assessment; Protection reinforcement

长输油气管道地质灾害区段风险评估与防护加固技术

吴毅辉 崔雅光

国家管网西北公司西安输油气分公司, 中国·陕西 西安 710018

摘要

我国长输油气管道多途经山区、黄土区、岩溶区等地质条件复杂地段, 滑坡、黄土湿陷、泥石流等地质灾害频发, 严重威胁管道运行安全与油气资源稳定供应。为开展地质灾害易发区管道风险评估、提升管道防灾加固效率, 本文结合外业地质调查, 综合运用监测与数值分析方法, 构建灾害易发区管道风险管理体系, 分析各类地质灾害作用下管道的失效模式, 研究配套防灾加固技术。研究成果可用于长输油气管道地质灾害易发区识别与风险等级评估, 提供高效技术手段降低管道运行风险, 保障管道安全稳定运行, 为地质灾害易发区长输油气管道风险管控与治理提供技术思路。

关键词

长输油气管道; 地质灾害; 风险评估; 防护加固

1 引言

伴随着长输油气管道工程建设规模的持续加大, 在工程建设期间势必会对沿途环境造成不同程度的破坏并遗留下地质风险隐患, 而在运营期管道也会遭受到人类工程活动的侵扰和自然环境的破坏, 在管道的全生命周期中, 由地质灾害引发的管道事故将不可避免的时有发生, 这给管道安全运营造成了巨大威胁。根据第十次欧盟天然气管道事故数据报告, 1970 ~ 2016 年, 世界范围地质灾害致管道失效占总

失效事故约 14%, 其中滑坡占 64.66%, 洪水占 14.66%, 河流冲刷占 4.31%, 采矿占 3.45%, 溃堤占 0.86%, 其他因素占 13.5%。随着 21 世纪全球管道总里程的高速增长, 地质灾害对管道安全运营造成的不良影响以及如何提高管道公司地质灾害管控水平将越来越被重视。开展长输油气管道沿线地质灾害重点区段风险识别与防护加固研究, 实现地质灾害风险精准识别与针对性防护加固, 提升管道防灾、抗灾、减灾能力, 对保障长输油气管道运营安全、保护沿线生态环境与公共安全具有重要现实意义与紧迫性。

【作者简介】吴毅辉 (1988—), 男, 中国陕西咸阳人, 本科, 管道管理技师, 从事长输管道地灾、风险评估研究。

2 长输油气管道地质灾害类型与致灾机理分析

2.1 典型地质灾害类型及分布特征

长输油气管道沿线地质灾害类型受地形地貌、岩土工程地质条件、气象水文、地质构造等因素控制,不同区域地质灾害发育特征差异显著。西北湿陷性黄土区以黄土湿陷、地面塌陷、边坡坍塌为主,该区域黄土疏松多孔,遇水浸湿后土体结构易破坏,产生不同程度湿陷变形,灾害多分布于管道穿越黄土塬、梁、峁、沟谷等部位;西南山地丘陵区地形复杂、岩体破碎、降雨集中,易诱发滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,灾害多沿线路两侧边坡分布,具有突发性强、破坏力大的特点;南方岩溶地貌区岩土体中溶洞、土洞发育,地下水活动频繁,易引发地面塌陷,导致管道地基失稳、受力不均。不同区域管道地质灾害类型差异明显,常出现多种灾害叠加发生或同一部位反复致灾的情况,管道受损兼具渐变与突发双重特征^[1]。

2.2 地质灾害对管道的破坏机理

各类地质灾害作用方式不同,对管道的损伤破坏机理存在差异。黄土湿陷、地面沉降主要引发管道不均匀沉陷变形,土体局部快速沉降使管道承受弯曲应力,当应力集中超过管道材料屈服应力时,会造成管道弯曲、防腐层刮擦破损,甚至断裂;滑坡、泥石流主要通过崩滑体与泥石流体的重力作用,以冲击、拖拽、挤压方式破坏管道,产生侧向推力与拉应力,导致管道受拉扭断、拉脱、挤压变形,甚至被直接剪断;崩塌落石以冲击荷载为主,落石冲击管道上方覆土,作用力传递至管道,造成管道局部凹陷、刮擦、开裂;岩溶地面塌陷导致管道下部土体瞬间悬空,管道在覆土自重与输送介质重力作用下,易发生拉伸破裂、接口松动、介质泄漏^[2]。管道损伤破坏均与岩土体变形、应力传递及管道自身受力状态相关,多因素耦合作用会加剧管道损伤。

2.3 灾害致灾影响因素耦合分析

长输油气管道地质灾害是自然营力与人类活动共同作用的结果。坡度、岩土体性质、地质构造、降雨、地下水位是主要自然致灾因素:坡度大于 15° 、黄土湿陷系数大于0.3、岩层破碎区域,地质灾害发生概率显著升高;降雨强度增大会快速降低土体抗剪强度,易引发边坡失稳、黄土湿陷等灾害。人为致灾因素主要包括管道建设施工、沿线工程活动、地下水资源开采等:管道施工中边坡开挖会扰动原状土体结构,处置不及时易诱发滑坡;沿线农田灌溉、工程排水导致地下水位抬升,会加剧黄土湿陷、岩溶塌陷等灾害。通过分析自然与人为致灾因素,识别主控因素并明确耦合作用规律,可为地质灾害防控与加固治理提供依据。

3 长输油气管道地质灾害区段风险评估技术

3.1 针对性风险评估指标体系构建

结合各段长输油气管道地质灾害的区域特征,构建层次化、差异化、针对性强且贴合现场实际的指标体系,替代

通用型指标体系。指标体系分为目标层、准则层、指标层:目标层为地质灾害易发区管道综合风险等级;准则层包含地质灾害易发性、管道易损性、防控难易性3类指标;指标层选取原则与准则层对应。其中,地质灾害易发性指标包括地质类型、灾害规模、地形稳定性、降水敏感度;管道易损性指标包括管道材料强度、管道埋深、管径、管道使用年限;防控难易性指标包括交通条件、施工作业空间、管道监测布设难度^[3]。结合不同地质灾害特征分配指标权重,湿陷性黄土区适当提高湿陷系数、地形高差、地下水位等指标权重,山区适当提高坡度系数、岩体风化破碎程度等指标权重,提升评估结果的准确性。

3.2 多方法融合风险评估模型

采用野外勘测、多手段监测与数值模拟相结合的耦合评价方法,弥补单一评价方法的缺陷。通过野外地质调查、原位测试获取沿线岩土条件、灾害点分布等基础数据;利用分布式光纤、InSAR监测、边坡测斜仪等设备,实时监测管道地表沉降、土体含水率、管道应力等数据,精准识别威胁管道安全的灾害点。采用层次分析法计算指标权重,结合模糊评价与FLAC3D数值分析,定量评价灾害风险概率与管道破坏后果等级,从单体灾害体到线路区间综合划分风险等级,将管道区段划分为高风险、中风险、低风险、无风险四级,指导后续防护加固工作。

3.3 工程案例风险评估实践

以西北某长输天然气管道黄土湿陷区段为研究对象,该管道管径813mm,已运行8年,途经黄土沟壑地段长度12.6km,区域黄土湿陷等级为II~III级,曾发生3处局部湿陷变形。采用上述评估方法对该区段开展风险评估,选取10处典型灾害隐患点,依据评估指标体系统计各项指标并赋值,评价结果见表1。结果显示,该区段高、中、低风险隐患点分别为3处、4处、3处,高风险点主要分布于黄土沟壑边坡及灌溉区下方,致灾类型为黄土湿陷与边坡滑塌耦合。该评估结果可精准锁定高风险管控区段,为后续重点防护加固提供依据,验证了该方法的可行性与有效性。

4 长输油气管道地质灾害区段防护加固技术

4.1 分灾害类型针对性防护技术

针对不同类型地质灾害采取差异化防治措施,实现因地制宜、精准治理。湿陷性黄土灾害点采用“地表封闭+土体加固+导排水系统”综合措施:地表采用黏土、混凝土盖板封闭,阻隔雨水、灌溉水下渗引发黄土湿陷;周边布设排水暗沟与截水沟,快速疏排地表水;湿陷严重区段采用灰土挤密桩加固土体,提升土体强度与地基稳定性。山地滑坡、泥石流灾害点采用“边坡锚固+挡挡工程+生态防护”综合措施:采用锚杆、锚索、框架梁加固边坡土体,抑制滑坡发育;坡脚设置拦石坝、泥石流导流槽,避免泥石流冲击管道;边坡表面栽植乡土植被,固土保水、减少坡面冲刷。

岩溶地面塌陷灾害点采用回填灌浆、梁板跨越、地基加固等措施：中小型溶洞采用砂、水泥浆回填灌浆加固；大型溶洞

采用梁板跨越结构，使管道支承于稳定地层；塌陷区地基采用 CFG 桩加固，提升地基密实度^[4]。

表 1 管道湿陷性黄土区段风险评估结果

隐患点编号	灾害类型	地质灾害危险性评分	管道易损性评分	防控难度评分	综合风险值	风险等级
1	黄土湿陷+滑塌	86	72	68	78.5	高风险
2	地面沉降	71	69	65	68.3	中风险
3	黄土湿陷	83	70	66	75.2	高风险
4	边坡滑塌	75	68	63	69.1	中风险
5	地面沉降	62	65	60	62.7	低风险
6	黄土湿陷	80	71	64	73.8	高风险
7	边坡滑塌	73	67	62	67.9	中风险
8	地面沉降	60	64	59	61.2	低风险
9	黄土湿陷	70	66	61	66.4	中风险
10	地面沉降	58	63	58	59.8	低风险

4.2 管道本体加固与抗变形技术

对受地质灾害影响轻微、已产生变形的在建及已建管道开展本体加固与抗变形改造，提升管道自身防灾能力。对于弯管变形、应力轻微超标管道，采用机械校正+局部补强加固工艺：使用管道校正器校正变形部位，粘贴碳纤维布或安装钢制套管进行局部加厚补强，恢复管道承载能力；对于接口破损、防腐层损坏管道，更换密封垫、修补防腐层，同时安装软接头，提升接口变形协调能力，分散土体变形应力，防止接口再次开裂。对于地质灾害高风险区段的已建与新建管道，宜选用抗变形能力强的柔性管材，并适当加大管道埋深，将管顶埋深控制在 2.0m 及以下，以此减小地表变形对管道的直接影响；同时在管道外壁与周边土体之间设置缓冲垫层，利用垫层的变形与耗能作用消散土体变形产生的附加应力，缓冲地质灾害对管道的冲击作用，提升管道在复杂地质条件下的抗变形与抗破坏能力。在管道应力敏感位置布设应力监测传感器，实现管道应力实时监测、早发现早处置。

4.3 监测预警与长效运维保障技术

构建空地一体监测预警体系，实现地质灾害超前预警，结合长效运维管理，形成“提前防护+持续监测+动态管控”模式。地面监测采用分布式光纤应变传感器、孔隙水压力传感器、位移传感器，实时监测灾害易发边坡、湿陷区段的应变变形、土体含水率、管道应力等数据；空中监测采用无人机 LiDAR、InSAR 等遥感技术，定期扫描管道沿线地表形变，预判地质灾害隐患。建立监测预警阈值体系，数据接近限值时及时发出预警，为应急处置预留时间^[5]。建立长效运维机制：地质灾害易发区段执行定期巡检制度，高风险区段缩短巡检周期，雨季、汛期加大巡检力度；建立隐患台账，定期检查防护加固工程质量，及时维修破损部位；定期开展运维

人员专业培训，提升应急处置能力，保障防护加固工程长效发挥作用。该技术体系应用于西北黄土管道案例后，高风险点灾害隐患得到有效控制，管道形变控制在允许范围内，未再发生湿陷、滑塌致管道损伤情况，防护效果显著。

5 结语

长输油气管道地质灾害易发区段风险防控是保障能源运输“生命线”安全的基础。定向风险评估技术可精准识别地质灾害风险点、划分风险等级，为防护加固提供依据；分类靶向防护加固技术可有效抵御地质灾害，降低灾害对管道的损伤程度，提升油气管道防灾安全性与运行可靠性。未来应持续推进大数据、人工智能与地质灾害风险评估技术融合，提升风险识别与预测精度；研发绿色高效、耐久的防护加固材料与施工技术，控制工程经济成本；强化全流程风险管理，逐步实现长输油气管道地质灾害事前精准预报、事中有效防控、事后高效养护，为管道地质灾害防治提供全方位技术支撑。

参考文献

- [1] 蓝明新.长输油气管道单体泥石流灾害风险评价研究[J].管道保护,2026,3(01):47-52+71.
- [2] 王宇.长输油气管道地质灾害防治统筹管理浅析[J].化工矿产地质,2021,43(04):356-363.
- [3] 王珀,姜垣良,刘英吉.中缅油气管道(缅甸段)地质灾害防治工程管理与实践[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(01):92-94.
- [4] 薛俊卓,詹辉,张国良,等.长输油气管道河沟段水毁灾害气象风险评估研究[J].安全与环境工程,2020,27(02):168-174.
- [5] 宋一纯.长输油气管道安全影响因素分析及安全监控管理体系研究[J].石油化工安全环保技术,2021,37(06):16-19+5-6.