

Analysis of dangerous factors and design of long distance oil and gas pipeline

Gang Wang

Zhongyou Liaohe Engineering Co., Ltd., Panjin, Liaoning, 124000, China

Abstract

Long-distance oil and gas pipelines are the core infrastructure supporting national energy transmission. Their safe operation is crucial for ensuring the stability of energy supply and public safety. During operation, these pipelines face numerous threats. Natural factors include geological disasters, extreme weather, and soil erosion. Human factors include construction defects, third-party damage, and operational errors. Additionally, issues such as material quality defects and equipment aging pose potential risks. To address these risks, it is essential to systematically integrate disaster prevention and protection strategies during the pipeline design phase. This paper aims to analyze multiple dimensions of hazardous factors and propose targeted design optimization measures, providing theoretical support and practical references for the safety of long-distance oil and gas pipelines throughout their lifecycle.

Keywords

pipeline hazard factors; long distance pipeline design; safety protection technology; risk prevention and control

石油天然气长输管道中危险因素及设计分析

王刚

中油辽河工程有限公司, 中国 · 辽宁 盘锦 124000

摘 要

石油天然气长输管道是支撑国家能源输送的核心基础设施, 其安全运行状况直接关联着能源供应的稳定性以及社会公共安全。管道在运行过程中面临着诸多威胁, 自然因素方面, 有地质灾害、极端气象、土壤侵蚀等情况; 人为因素方面, 则存在施工缺陷、第三方破坏、操作失误等现象; 而且管材质量存在缺陷以及设备老化这类问题也形成了潜在的隐患。面对这些风险, 在管道的设计阶段, 就需要对防灾以及防护策略进行系统性的整合。本文的目的在于, 通过对多维度危险因素展开分析, 进而提出具有针对性的设计优化措施, 从而为石油天然气长输管道全生命周期的安全给予理论层面的支持以及实践方面的参考。

关键词

管道危险因素; 长输管道设计; 安全防护技术; 风险防控

1 引言

在石油天然气产业链里, 管道输送的安全性直接影响能源保障能力以及生态环境安全。长距离管道系统那复杂的运行环境, 衍生出了三类核心风险, 即自然威胁、人为干扰和设备失效。管道的断裂或位移, 可能由地质活动引发; 设备的正常运转, 会受到气象灾害的干扰; 材料的劣化, 会被土壤特性加速。事故概率, 会因施工质量存在瑕疵、第三方操作失误以及蓄意破坏而增加。系统的可靠性, 还会被管材原始缺陷及设备老化进一步削弱。对于上述这些问题, 在设计环节就得把工程技术与风险管理融合起来, 通过合理选址、优化材料、加固结构以及智能监控的方式, 将本质安全

水平提升上去。

2 石油天然气长输管道危险因素分析

2.1 自然因素

长输管线是远距离输送燃气、燃油、化学品等流体介质的工业管道系统, 按材料分为金属与非金属两类, 设计压力覆盖真空至超高压 (最高达 100MPa 以上), 广泛应用于油气集输、城市燃气供应及能源基地输送等领域。地质构造运动引发的地壳形变直接作用于管道本体, 岩土位移产生的剪切力可能导致管段屈曲变形或接口失效, 此类现象在山地断裂带与板块活跃区尤为显著。滑坡体推移与泥石流冲击荷载则会改变管道轴向受力状态, 埋深不足的管段存在被地表运动裹挟的风险。大气放电现象对绝缘设施构成电涌威胁, 雷击感应电压可击穿阴极保护系统的恒电位仪, 并干扰沿线光缆通信信号的稳定传输。强风环境不仅加剧裸露管段的振动疲劳, 极端降雨引发的洪水冲刷更会削弱管道基础结构

【作者简介】王刚 (1985-), 男, 中国河北唐山人, 本科, 工程师, 从事油气田地面工程研究。

的承载能力,冻土区反复冻胀融沉过程则造成管墩不均匀沉降。土壤介质对金属材料的电化学腐蚀具有隐蔽性和持续性,高盐分或低电阻率土壤环境加速管壁电解损耗,而土壤密实度差异形成的差异沉降将改变管道应力分布,特别是在回填土压实度不足的河床穿越区段,持续的地应力重分布可能诱发超过设计阈值的弯曲应变^[1]。

2.2 人为因素

管道焊接过程中未熔合或夹渣类隐蔽缺陷在服役期间逐步扩展为穿透性裂纹,防腐层机械损伤则使管体金属直接暴露于腐蚀介质。施工阶段为赶进度而简化流程的行为,例如牺牲沟槽开挖坡度要求或回填土压实工序,导致后续局部管段应力集中现象加剧。临近管道区域进行的道路施工或农用机械作业可能误触埋地管道,重型设备碾压荷载超出管道设计承压范围时引发塑性变形。非法的管道打孔盗油活动不仅造成介质泄漏,野蛮操作产生的工具划痕更会削弱管壁有效厚度。控制室操作员对压力波动信号的延迟响应可能错失工况调节窗口期,调度指令传达偏差致使不同泵站间流量匹配失衡。仪表设备校准失效导致流量计读数偏离真实值,阀门启闭机构卡涩则造成调节滞后,这类动态响应异常往往叠加为系统级运行风险。管道定期维保计划执行缺位加速密封件老化失效,备品备件库存不足进一步延长设备停运修复周期。

2.3 管材与设备因素

冶金制造过程产生的非金属夹杂物或晶间偏析致使管材局部抗拉强度降低,冷弯加工形成的残余应力区域在输送介质压力循环作用下易萌生应力腐蚀裂纹。管体表面运输擦伤未按规定修复时,几何不连续部位成为疲劳裂纹优先扩展的薄弱点。防腐层涂覆工艺参数偏差导致覆盖层孔隙率超标,地下水渗入后形成电化学腐蚀原电池加速壁厚减薄。泵机组轴承长期处于高转速工况诱发滚道剥落,振动频谱偏移量积累到临界值后引发转子动平衡失稳。阀门密封填料经高温介质反复冲刷出现碳化脆裂,阀杆螺纹副磨损间隙增大导致关断行程定位失准。变送器膜盒在压力脉动环境中产生金属蠕变,漂移的零点信号使控制回路产生滞后调节。变频器IGBT模块老化后开关特性劣化,输出电压谐波干扰电机绝缘性能。管道泄压系统弹簧因应力松弛丧失设计预紧力,安全阀起跳压力偏离安全阈值。SCADA系统通讯模块在电磁干扰环境中偶发数据丢包,上位机画面刷新延迟掩盖实时工况异常。设备诊断未按周期执行遗漏齿轮箱润滑油黏度衰减问题,备件仓储条件不当加速橡胶密封件弹性失效。设备维保记录缺失难以追溯老化件更换时效,部分区域因检修通道限制推迟关键设备预防性试验^[2]。

3 石油天然气长输管道设计应对策略

3.1 管道线路选择与规划

地理信息系统深度分析区域地震断裂带分布与滑坡历

史数据,规划阶段主动避让地壳活跃板块挤压区及泥石流扇形堆积区。管线水平轨迹设计充分考虑冻土融沉地质分界线走向,采用大曲率转角方案适应丘陵地貌连续起伏特征。人口密集区采用增大管道埋深方案减少地面活动干扰,河流穿越点优先选择河床地质稳定且水流冲刷作用较弱的窄断面实施定向钻作业。伴行公路敷设段预留足够作业带宽度以便机械通道通畅,山体陡坡区依据岩体风化程度差异设计阶梯式锚固墩分散管道轴向应力。阀室选址参照水力瞬态模拟计算结果平衡压力波衰减需求,将其布设在地势较高且地质承载条件良好的台地位置可兼顾防洪与设备维护通道建设需求。输气管道与高压输电线路平行段严格执行电磁干扰安全间距标准,管道路权范围内限制深层根茎植物种植规避根系穿刺防腐层风险。管道转角点设置阴极保护测试桩采集电位数据,连续水域穿越段增加牺牲阳极组数量补偿保护电流流失。施工便道规划兼顾重型设备转运效率与表土剥离量控制原则,永久性监测光缆敷设路径需避开农耕机械常规作业深度范围^[3]。

3.2 管道材质与防腐设计

冶金成分设计中提升铬钼元素配比可增强管材抗硫化物应力开裂能力,基于应变设计理念的X80级钢管在冻土沉降段允许更大塑性变形量而不丧失承压功能。三层聚乙烯防腐层采用熔结环氧粉末打底工艺消除钢表面锚纹波峰空隙,配套使用丁基橡胶热熔胶带实现弯管区域无死角包覆。大口径管道工厂预制段引入全自动抛丸除锈装备使表面清洁度达到Sa2.5级,流体化床涂装生产线精确控制环氧粉末流平温度与胶化时间形成均质覆盖层。高后果区管道升级为机械式复合管结构,冶金结合的不锈钢内衬层隔绝介质中的氯离子点蚀风险。强制电流阴极保护系统根据土壤电阻率图谱分区设定整流器输出参数,深井阳极地床布置在低电阻率地质单元提高电流覆盖半径。管道跨越段实施绝缘接头电隔离避免杂散电流干扰,恒电位仪配备远程电位采集模块修正土壤干湿循环引起的IR降误差。定向钻穿越段防腐层额外增加聚氨酯增强膜抵抗岩屑刮擦,温度传感器预埋在热力补偿弯头处监测聚烯烃补口材料玻璃化转变临界点。管道电位测绘采用密间隔测点法与直流梯度法交叉验证,土壤酸碱度实时监测数据同步联动阴极保护参数自调系统。季节性冻胀区管道外保温层选用闭孔泡沫玻璃材料阻断冷桥效应,其憎水特性有效防止反复冻融循环造成的保温结构解体。

3.3 管道结构与应力设计

基于应变设计理念的管道通过增加壁厚冗余度吸收地质灾害引发的弯曲变形,活动断层穿越段采用蛇形敷设路线释放断层错动产生的轴向压缩能。热力补偿设计中大位移量旋转式补偿器替代传统 π 型补偿弯头,其球形密封结构可自适应三维方向热伸缩位移且降低流阻损失。高落差段设置水击泄压阀与缓闭止回阀串联控制系统,水锤模拟软件预演不同关阀速率下的压力振荡波峰避免管材低周疲劳破坏。悬

索跨越结构主缆预应力施加值依据百年一遇风荷载与覆冰荷载组合工况计算,防风减震器沿管身间隔布置抑制卡门涡街诱发的横向振动谐波。冻土区管道采用高密度聚乙烯保温管壳延迟融化圈扩展速率,其闭孔结构与沟槽底部铺设的碎石排水层形成协同防冻胀体系。锚固墩混凝土基座嵌入微风化基岩层 1.5 米深度,抗拔钢筋笼与管体加强板焊接成整体传力结构抵抗滑坡体的水平剪切力。弯管制造阶段实施壁厚增量补偿工艺,外拱部位增厚 12% 平衡内压作用下环向应力分布不均现象。管道与储罐连接处安装多向波纹膨胀节隔离地基差异沉降位移,非金属补偿层消除阴极保护电流通路阻断问题。管道振动监测点布设在机泵出口第一个弯头处,光纤应变传感系统实时捕捉 0.1 毫米级管壁微应变信号。管桥支座采用聚四氟乙烯滑动垫片配合限位挡块设计,在满足温度位移的同时控制罕遇地震下的脱架位移阈值^[4]。

3.4 安全监测与控制系统设计

安全监测与控制系统构建了现代长输管道安全运行的技术基石,其设计内核聚焦于建立覆盖管道全生命周期的实时感知与分析架构。分布式传感装置密集部署于关键路由节点及高风险区域,持续采集管道压力变化、温度梯度异常及介质流动状态等核心参数,结合地理信息系统平台建立多动态运行模型。数据智能处理引擎成为连接原始信息与决策指令的枢纽,运用多源信息融合技术精准识别微小渗漏特征或应力畸变信号,将传统被动响应提升为具备预测能力的主动防控模式。操作平台的人机工程学设计充分考虑调度人员的认知负荷,将复杂风险信息转化为可视报警层级与处置优先级序列,落实指令执行的准确性与时效性。系统工程属性要求软硬件模块保持高度兼容性与容错冗余度,主干通信链路采取异构双通道架构避免信号中断,野外站点配备自主能源保障极端条件下的持续监控能力,从底层设计降低技术失效诱发连锁反应的可能性。定期技术迭代机制不可或缺,通过引入新型光纤声波传感或机器视觉巡检设备,不断扩展系统对地质活动与第三方施工扰动等外部威胁的感知边界,使监测能力始终优于管道环境变化的复杂性增长曲线,将理论模型与实际应用深度融合以实现风险闭环管理^[5]。

3.5 应急预案与风险管理设计

在石油天然气长输管道架构中,应急预案与风险管理

设计的核心着眼于通过前瞻性框架主动抵御突发事件对管网的潜在威胁。实际应用中,风险识别环节深入剖析运行环境的复杂变量,例如管道腐蚀老化或地质条件变化,需利用实时监测技术如传感器网络精准捕获异常信号并触发自动报警机制。管理策略则构建覆盖全周期的防御体系,重点强化人员协作能力的训练模拟与反馈回路,促进高效沟通平台整合资源迅速调动救援力量;同时融入定期风险再评估程序,依据历史数据和现场反馈优化预案细节确保其动态适应性,从而形成从预警到处置的无缝流程以维持管道运营的长期稳定。设计阶段注重技术手段与实际情境的结合,采用模块化方案简化响应步骤提升实操性,而工程实践强调韧性强化,借助系统冗余设计减少单点故障带来的连锁反应,为管道的安全性能注入持续提升的动力。

4 结语

管道安全风险的管控,需凭借事前预防、过程监控以及应急响应所构成的全链条防护来达成。在设计阶段,要对灾害易发区给予优先避让的处理,对于管材防腐以及应力控制的标准需严格执行,通过植入高精度监测技术来实现对泄漏情况的早期预警。在结构设计方面,要使地质环境承载力与设备抗震需求达到平衡的状态,并且预留出用于风险缓冲的空间。应急预案应当将事故响应流程以及资源调配机制全面覆盖。未来的设计理念,需对智能诊断系统的应用予以强化,把风险识别嵌入到管道数字化模型之中,进而形成动态的安全防护体系,以此为全球能源动脉的可持续发展给予技术层面的有力支撑。

参考文献

- [1] 许平非. 石油天然气管道施工质量管理分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2025, 45 (10): 44-46.
- [2] 段腾龙,刘永铭,杨江山. 天然气长输管道占压安全隐患治理 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44 (19): 82-83+89.
- [3] 叶勇. 石油天然气长输管道内充填技术研究 [J]. 石油和化工设备, 2024, 27 (08): 69-71+63.
- [4] 王锐龙. 天然气管道工程施工建设质量管理策略分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44 (14): 13-15.
- [5] 唐彬彬,陆耀民. 天然气长输管道运行中的地质灾害风险分析及控制 [J]. 现代盐化工, 2024, 51 (02): 71-73.