

极端气候条件下天然气管道运行安全保障研究

付帅¹ 张帆¹ 王明²

1. 国家管网集团北京管道有限公司山西输油气分公司 山西 太原 030000

2. 国家管网集团北京管道有限公司内蒙古输油气分公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘要: 本文系统分析了不同极端气候类型对天然气管道本体、附属设施及运行控制系统的潜在威胁机制,梳理了当前国内外在极端气候适应性设计、风险评估、监测预警、应急响应等方面的技术现状与不足。在此基础上,提出构建“全生命周期—多维度协同”的天然气管道极端气候安全防护体系,涵盖规划设计阶段的韧性提升、运行维护阶段的智能监测与风险动态评估、应急处置阶段的快速响应机制,并结合数字孪生、人工智能、高精度气象预报等新兴技术,探索智能化、主动化的安全保障路径。研究旨在为提升我国天然气管道系统在极端气候下的韧性与可靠性提供理论支撑与实践指导。

关键词: 极端气候;天然气管道;运行安全;风险评估;韧性设计;智能监测;应急响应

引言

天然气因其清洁、高效、灵活的特性,在全球能源转型中扮演着不可替代的角色。在我国“双碳”战略目标驱动下,天然气消费量持续增长,国家油气主干管网里程已突破15万公里,形成了横跨东西、纵贯南北的庞大输送网络。然而,这一网络广泛分布于高原、沙漠、冻土、沿海、山地等多种复杂地理与气候区域,其安全稳定运行面临日益严峻的外部环境挑战。我国北方地区冬季极寒、南方夏季洪涝、西部地区地质灾害频发等,均对天然气管道安全构成直接威胁。极端气候不仅可能造成管道物理损伤(如冻胀、冲刷、滑坡、热应力变形),还可能干扰控制系统、破坏通信设施、阻碍应急抢修,进而引发泄漏、火灾甚至爆炸等重大安全事故,造成巨大的经济损失、环境破坏与社会影响。因此,深入研究极端气候条件下天然气管道运行安全保障问题,不仅是保障国家能源安全的迫切需求,也是推动管道行业高质量发展、提升基础设施韧性的关键课题。

1 极端气候对天然气管道的主要威胁类型与机理

1.1 低温与冻土环境

在极寒气候或多年冻土区域,天然气管道面临一系列独特的力学与材料挑战。当环境温度骤降至零下数十摄氏度时,管道所用钢材的韧性显著降低,脆性增加,尤其在存在焊接缺陷或几何不连续处,极易诱发脆性断裂。与此同时,冻土在冻结过程中体积膨胀,产生强大的冻胀力,可对埋地管道施加非均匀外载,导致局部弯曲甚至屈曲;而春季融冻期土壤承载力急剧下降,又可能引发管道沉降或悬空,形成附加应力集中。此外,若管道内存在未完全脱除的游离水,在低温条件下易生成天然

气水合物或冰晶,堵塞调压阀、过滤器等关键设备,不仅影响正常输气,还可能因局部压力异常升高而触发安全阀动作甚至管道破裂。值得注意的是,极低温还会导致阴极保护系统效率下降、仪表精度失准、电动执行机构卡滞等附属设施功能退化,进一步削弱整体系统的可靠性。

1.2 高温与干旱环境

持续高温与长期干旱对管道系统的威胁主要体现在热力学效应与土壤环境劣化两个方面。在夏季高温环境下,尤其是浅埋或暴露于阳光直射的管段,管道受热膨胀受限时将产生显著的轴向压应力,一旦超过临界屈曲载荷,便可能发生侧向屈曲隆起,严重时可导致管道破裂。与此同时,干旱使土壤水分大量蒸发,土体干缩开裂,不仅削弱了对管道的支撑作用,还大幅提高土壤电阻率,致使阴极保护电流难以有效分布,加速管道外腐蚀进程^[1]。更为隐蔽的是,干旱导致地表植被枯萎死亡,一旦后续遭遇强降雨,缺乏根系固结的坡面极易发生水土流失、滑坡或泥石流,间接威胁管道安全。这种“高温—干旱—暴雨”的复合灾害链,已成为近年来南方丘陵地区管道安全的新隐患。

1.3 暴雨、洪水与水文突变

短时强降雨或流域性洪水对天然气管道的破坏具有突发性强、影响范围广的特点。高强度降雨迅速汇流形成地表径流,冲刷管沟覆土,使管道暴露甚至悬空,承受额外的弯曲应力与水流冲击振动,长期作用下可能导致疲劳损伤或接头失效。在河谷、低洼地带,洪水产生的浮力可能使整段管道上浮移位,破坏原有路由稳定性。更严重的是,雨水入渗软化岩土体,极易诱发山体滑坡、崩

塌或泥石流，直接掩埋、剪切或冲击管道本体。此外，阀室、分输站等地面设施若防洪标准不足，可能被洪水淹没，造成电力中断、控制系统瘫痪、通信失联，使得远程监控与应急操作无法实施，极大延缓事故响应速度。

1.4 强风与沙尘暴

虽然天然气管道多为埋地敷设，但在跨越河流、山谷或穿越特殊地形时，常采用架空桁架或地上管段，这些结构在台风、龙卷风或强沙尘暴中尤为脆弱。强风对高耸结构施加巨大风载荷，可能引起结构共振、失稳甚至倒塌，直接损毁管道。同时，高速风携带的沙粒具有强烈磨蚀性，长期作用会磨损站场设备外壳、仪表窗口、通信天线等精密部件，降低其使用寿命与可靠性。在极端沙尘天气下，能见度急剧下降，不仅影响日常巡检作业安全，更严重制约应急抢修队伍的现场抵达与操作效率，形成“灾害一响应受阻—风险放大”的恶性循环。

1.5 地震与地质活动

尽管地震通常归类为地质灾害，但近年研究表明，气候变化（如冰川消融、水库蓄水）可能通过改变地壳应力场间接诱发地震活动。对于穿越活动断层带的管道，地震造成的断层错动可直接剪切管道；在饱和砂土地基中，地震液化会导致地基承载力瞬间丧失，引发管道不均匀沉降或扭曲；而在山区，地震波震动极易触发大规模山体滑坡或岩崩，对管道形成毁灭性冲击^[2]。此类灾害往往具有瞬时性与不可预测性，对管道结构完整性构成最严峻的考验。

2 现有安全保障体系与技术瓶颈

2.1 设计与建设阶段

当前天然气管道设计主要依据《输气管道工程设计规范》（GB50251）及ASME B31.8等标准，虽已考虑部分极端工况，但在应对气候变化新态势方面仍显不足。首先，设计所采用的气象与水文参数多基于历史观测数据，未能充分纳入未来气候情景（如RCP4.5、SSP2-4.5）下的趋势预测，导致重现期取值偏低，抗灾冗余不足。其次，现有设计方法普遍将各类灾害视为独立事件处理，忽视了“高温+干旱+暴雨”“冻融循环+地震”等多灾种耦合作用下的叠加或放大效应，难以真实反映实际风险。更重要的是，传统设计理念侧重于满足强度与稳定性要求，缺乏对系统整体韧性的考量，例如未充分规划功能冗余、快速恢复路径或自适应调节能力，使得管道在遭受极端冲击后恢复周期长、社会影响大。

2.2 运行监测与风险评估

在运行阶段，尽管SCADA系统实现了基本的远程监控，但面对极端气候的动态演化，现有监测手段仍存在

明显局限。人工巡检周期长、覆盖面有限，难以捕捉突发性地质变化；传统内检测工具受运行条件限制，无法实现高频次、全时段覆盖。虽然光纤传感、无人机巡检等新技术逐步应用，但尚未形成标准化、规模化部署。风险评估方面，多数企业仍依赖静态打分法或经验模型，评估结果更新滞后，无法融合实时气象预报、土壤含水率、管道应力状态等多源动态数据进行滚动预测。预警机制亦较为粗放，往往仅依据单一阈值（如24小时降雨量超过100毫米）触发警报，缺乏对灾害链传导路径与管道脆弱点的智能判别能力，导致预警时效性与精准度不足。

2.3 应急响应与恢复

当前应急预案普遍存在通用性强、针对性弱的问题，难以匹配不同极端气候场景下的差异化处置需求。例如，针对冻土区管道冻胀与南方洪涝导致的悬空，所需抢修工艺、装备与人员技能截然不同，但预案内容往往笼统模糊。此外，极端天气常伴随交通中断、通信受阻，使得应急物资调配与抢修队伍投送严重滞后。更深层次的问题在于信息壁垒：气象部门发布暴雨红色预警、自然资源部门监测到滑坡风险、管道企业掌握管段应力异常，但各方数据未有效整合，导致决策层无法形成全局态势感知，协同响应效率低下。这种“信息孤岛”现象严重制约了应急指挥的科学性与时效性。

3 构建“全生命周期—多维度协同”的安全保障体系

3.1 规划设计阶段：强化气候韧性

为从根本上提升管道系统抵御极端气候的能力，必须在规划设计源头注入韧性理念。首先，应利用高分辨率气候风险地图，结合未来30-50年气候情景模拟，科学避让高风险区域，如百年一遇洪水淹没区、活动断层带、不稳定滑坡体等。其次，建立气候设计参数动态更新机制，将最新气候模型输出纳入规范修订，确保设计基准与时俱进。在结构设计上，需因地制宜采取针对性措施：在冻土区推广保温管、热棒及碎石通风路基等技术，主动调控地温以维持冻土稳定；在洪水易发区增加埋深、设置混凝土配重块或采用柔性接头以增强抗冲刷能力；在高温干旱区优化路由走向，避免强日照暴露，并设置应力释放弯以缓解热膨胀约束^[3]。此外，应在关键节点引入功能冗余设计，如双回路供电、多通道通信、备用输气线路等，确保局部失效不致引发系统性中断。

3.2 运行维护阶段：智能监测与动态风险评估

运行阶段的安全保障核心在于实现“感知—分析—预警”的闭环管理。应构建天地一体化监测网络：利用卫星InSAR技术对大范围地表形变进行毫米级监测；通过搭载LiDAR与红外热像仪的无人机开展高频次、高精度

巡检,识别冲刷、沉降或热异常;在管线上部署分布式光纤声学传感(DAS)系统,实现泄漏、第三方破坏等事件的实时定位。在此基础上,整合SCADA运行数据、短临气象预报、地质监测信息、视频监控等多源异构数据,构建管道数字孪生体,实现物理系统与虚拟模型的同步映射。依托人工智能算法(如LSTM、图神经网络),建立极端气候—管道响应耦合模型,对风险概率、后果严重度及系统脆弱性进行分钟级滚动预测,并自动生成分级预警与处置建议,推动风险评估从静态向动态、从定性向定量转变。

3.3 应急响应阶段:精准预警与快速恢复

高效的应急响应依赖于精准预警与快速协同。基于数字孪生平台,可模拟极端气候演进过程及其对管道的影响路径,提前72小时发布区域性风险预警,48小时锁定高风险管段,并在24小时内启动预控措施,如降压运行、提前排水、加固边坡等,实现“关口前移”。在装备方面,应研发适用于极端环境的模块化应急装备,如抗低温快速封堵器、轻型临时支撑架、移动式阴极保护装置等,并建立区域化应急物资储备库。最关键的是打破部门壁垒,构建跨部门协同指挥平台,打通企业、气象、应急、交通、医疗等多方数据链,利用GIS+BIM技术实现灾情可视化、资源可视化、路径可视化,优化救援调度^[4]。同时,应建立极端气候下的应急通信保障机制,如配备卫星电话、Mesh自组网设备,确保“断路不断联”。

4 关键技术支撑与未来展望

未来天然气管道极端气候安全保障能力的跃升,离不开关键技术的突破与制度体系的完善。在技术层面,亟需发展公里级、小时级的高精度气象—地质耦合预报模型,提升灾害预见期;加快管道专用新材料(如高韧性低温钢、耐高温复合材料)的研发与工程应用;深化数

字孪生与人工智能的融合,构建具备自主学习与决策能力的智能管道系统。在制度层面,应推动修订现行设计规范,强制纳入气候变化适应性条款;制定极端气候下管道安全运行的国家或行业标准;并通过立法促进跨部门气候风险数据共享,为协同治理提供制度保障。唯有技术与制度双轮驱动,方能实现从“被动防御”向“主动免疫”的根本转变。

5 结语

传统“以静制动”的防护模式已难以应对日益复杂、动态的气候风险。本文提出构建覆盖“规划设计—运行维护—应急响应”全生命周期,融合“工程韧性—智能监测—协同管理”多维度的综合安全保障体系。该体系以数字孪生为底座,以人工智能为引擎,以高精度气候预报为先导,通过强化前端韧性设计、中端智能感知与动态评估、后端精准应急响应,全面提升管道系统在极端气候下的抗扰动能力、自适应能力与快速恢复能力。未来,随着气候变化持续深化,天然气管道安全将面临更多未知挑战。唯有坚持科技赋能、系统治理、协同联动,方能筑牢国家能源动脉的安全屏障,为能源转型与经济社会可持续发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]王晨之,彭方超.天然气管道安全运行影响因素及防范措施[J].石化技术,2023,30(05):196-198.
- [2]徐佳.长输天然气管道运行的安全风险与对策研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(10):38-40.
- [3]耿峰峰.天然气管道运输安全运行管理中的潜在风险及解决方案探究[J].石化技术,2024,31(09):288-290.
- [4]张文馨.长输天然气管道安全防范及安全生产运行对策浅析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(04):37-39.