

天然气管道输送安全关键技术与进展研究

梁二伟（江西中石油昆仑燃气有限公司，江西 萍乡 337000）

摘要：随着全球能源需求增长和管网规模的扩大，管道输送面临的安全挑战日益复杂，涵盖材料老化、地质灾害、人为破坏等多重风险。在此背景下，管道输送安全技术的研发与应用成为行业关注焦点。本文从基础理论、关键技术及前沿进展三个维度展开分析，旨在有效提升管道输送的安全性与可靠性，为行业可持续发展提供支撑。

关键词：天然气管道输送；安全监测；腐蚀防护；风险预警

中图分类号：TE88

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）021-0124-03

Research on Key Technologies and Progress of Natural Gas Pipeline Transportation Safety

Liang Erwei (Jiangxi PetroChina Kunlun Gas Co., Ltd., Pingxiang Jiangxi 337000, China)

Abstract: With the growth of global energy demand and the expansion of pipeline networks, the safety challenges faced by pipeline transportation are becoming increasingly complex, covering multiple risks such as material aging, geological disasters, and human damage. In this context, the research and application of pipeline transportation safety technology has become a focus of industry attention. This article analyzes from three dimensions: basic theory, key technologies, and cutting-edge progress, aiming to effectively improve the safety and reliability of pipeline transportation and provide support for the sustainable development of the industry.

Keywords: natural gas pipeline transportation; Safety monitoring; Corrosion protection; Risk Warning

天然气管道系统作为连接能源生产与消费的核心基础设施，其安全运行是实现能源高效调配的关键环节。随着管道网络向高压力、长距离及复杂地质环境延伸，输送过程中面临的失效风险呈现多源性与动态性特征，涵盖机械损伤、化学侵蚀、第三方干扰等多维度威胁。近年来，材料科学、信息技术与安全工程的交叉融合，为管道完整性管理、动态风险防控及事故快速处置提供了新的技术路径。

1 天然气管道输送技术概述

天然气管道输送技术是以长距离、大规模运输天然气为目标，通过管道网络实现气源与终端用户的高效连接，现代管道系统通常由干线管道、加压站、阀门及监测终端组成，依赖材料科学与工程技术的协同创新，例如采用高强钢、复合材料等提升管道承压与抗腐蚀能力。随着能源需求增长，输送技术逐步向高压、大口径方向发展，同时融合自动化控制与智能监测手段，实时调控流量与压力，保障运行安全^[1]。此外，针对复杂地质条件，管道铺设技术持续优化，例如定向钻探、柔性管道设计等。

2 天然气管道输送安全关键技术

2.1 管道腐蚀与防护技术

随着天然气管道向高腐蚀性介质区域及复杂地质环境延伸，金属管体在土壤、水分、酸性组分等作用下的腐蚀风险显著增加，成为威胁输送安全的首要隐

患。腐蚀防护技术体系需从材料性能优化及电化学干预协同发力，构建覆盖全生命周期的主动防御机制。在材料层面，管道基体材料的抗蚀性能是防护体系的基础。通过冶金工艺改进，开发低硫磷含量、高纯净度的高强钢，可有效抑制氢致开裂与硫化物应力腐蚀。针对管道内壁接触天然气中酸性组分的腐蚀风险，采用内涂层技术形成物理隔离屏障，结合缓蚀剂加注工艺，降低介质对管壁的侵蚀作用。外防护则依赖于多层复合涂层体系，涵盖环氧粉末底层、聚合物中间层及聚乙烯外护套，通过提升涂层致密性、附着力及抗老化性能，阻断土壤中水分、盐分及微生物的渗透路径^[2]。

在电化学防护层面，应采用阴极保护技术，利用施加外加电流或牺牲阳极材料，使管道表面电位极化至腐蚀免疫区间，从而抑制金属氧化反应。针对长输管道复杂工况，需结合土壤电阻率、杂散电流干扰等参数，优化阳极地床布局与电流输出策略，实现保护电位的均匀分布。此外，阴保系统与涂层防护的协同作用可显著降低局部腐蚀风险，尤其在涂层缺陷或老化区域，阴极保护能够弥补物理屏障的不足。

2.2 管道泄漏检测与修复技术

天然气管道一旦发生泄漏，轻则造成能源浪费与经济损失，重则引发火灾、爆炸等灾难性事故，对生态环境与公共安全构成直接威胁。如何快速定位泄漏

点并实现高效修复，是保障管道系统安全运行的核心任务。当前，泄漏检测与修复技术已形成“精准感知—快速响应—长效修复”的闭环链条，覆盖从早期预警到事故处置的全流程。

泄漏检测技术关键在于提升微小泄漏的识别能力与定位精度。基于光纤传感的分布式声波监测系统通过布设于管道沿线的光纤网络，实时捕捉气体泄漏引发的微振动信号，结合模式识别算法区分环境噪声与泄漏特征，可在数分钟内锁定泄漏范围。同时，无人机搭载高分辨率红外热成像与气体检测模块，对地形复杂区域进行空中巡检，配合地面激光甲烷遥测设备，形成立体化监测网络。针对长输管道的连续监测需求，智能清管器定期在管道内运行，通过磁通泄漏检测或超声传感技术扫描管壁缺陷，生成腐蚀、裂纹等隐患的三维图谱，为泄漏风险评估提供数据支撑。该技术在实践中，需兼顾时效性与可靠性，最大限度减少停输时间。

对于低压或中压管道，采用复合材料快速堵漏技术，利用碳纤维增强材料与环氧树脂在泄漏点外部形成高强度包覆层，可在带压条件下实现临时封堵。针对高压主干管道，智能封堵机器人通过机械臂夹持记忆合金夹具或液压卡具，在泄漏点上下游实施管内封堵，隔离受损管段后，利用自动焊接设备完成局部换管作业。在深海或冻土区等特殊环境中，水下湿法焊接、低温固化涂层等工艺的应用，可适应复杂工况下的修复需求。

2.3 管道压力与应力管理技术

在天然气管道运行中，内部介质压力与外部环境载荷共同作用形成的复杂应力场，是导致管体变形、疲劳损伤甚至断裂失效的主要诱因。当前，压力与应力管理技术已从单一参数控制转向多物理场耦合优化，贯穿设计、施工、运维各环节，形成动态平衡的安全防护体系。压力管理主要是维持输送过程中压力的稳定性，避免超压或压力骤降引发的风险。在实践中，其通过压缩机站与调压阀的协同控制，实时调节管道内介质压力，确保其在材料许用应力范围内波动。针对水击效应等瞬态压力冲击，采用水力仿真模型预测压力波传播规律，优化阀门启闭逻辑与缓冲罐布局，抑制压力突变对管体的冲击。同时，在管道关键节点布设高精度压力传感器，结合SCADA系统实现压力数据的秒级采集与异常报警，为主动干预提供依据^[3]。

应力管理则聚焦于管道在复杂环境下的力学行为分析与控制。通过有限元仿真技术模拟管道在温度变化、地质沉降、地震载荷等外部作用下的应力分布，优化管道走向、支撑结构及补偿器设置，降低局部应

力集中风险。对于穿越活动断层或冻土区的管段，采用柔性设计理念，例如增加管道壁厚、使用应变硬化钢材或铺设可滑移支座，提升管体对地壳变形与冻胀融沉的适应能力。此外，定期开展应力检测，利用光纤光栅传感器或分布式应变监测系统，实时捕捉管壁微应变数据，结合疲劳损伤模型评估剩余寿命，动态调整运行参数以延缓裂纹萌生。智能化技术的融入进一步提升了管理效能。基于数字孪生技术构建管道应力状态的三维可视化模型，集成实时监测数据与历史运维记录，通过机器学习算法预测应力演变趋势并生成调控建议。例如，在极端天气或地质灾害预警时，系统可自动调整输气压力、启动应急减压程序或触发管道降温措施，避免应力超限导致的结构失效。

2.4 管道完整性评价技术

在天然气管道长达数千公里的输送网络中，每一段管体的微小缺陷都可能演变为系统性风险。管道完整性评价技术正是通过科学评估与动态管理，确保管道从设计到退役的全生命周期内始终处于可控状态。这项技术以数据为驱动，融合检测、建模与决策，形成“识别隐患—量化风险—定向干预”的闭环管理模式，成为预防重大事故的核心防线。完整性评价的在于多维数据的精准采集与整合，通过智能清管器搭载高精度漏磁、超声或激光检测模块，定期对管道内壁进行检查，识别腐蚀坑、裂纹或机械损伤的几何特征与分布规律。同时，外检测技术结合无人机航拍、地面渗透仪与光纤应变监测，评估涂层老化、土壤沉降及第三方活动对管体的影响。所有数据经标准化处理后，输入管道完整性管理平台，构建涵盖管材性能、环境载荷与历史维修记录的数字档案库，为风险量化提供底层支撑。

风险建模层面，基于失效可能性与后果分析框架，建立管道缺陷演化模型与应力—应变响应模型，模拟不同工况下缺陷扩展的动态过程。例如，针对腐蚀缺陷，结合剩余强度评价准则，计算管壁减薄区域的临界承压能力，判断是否需要降压运行或紧急修复。对于地质灾害频发区，利用有限元仿真预测管体在滑坡、地震等极端条件下的形变阈值，指导支撑结构加固或改线规划。评价结果的落地依赖于分级管控与动态优化。根据风险等级将管段划分为高、中、低优先级，制定差异化的检测周期与维护策略。高风险区段采用高频次内检测与人工复核，中低风险区域则依托远程监测数据实施状态跟踪。与此同时，应建立完整性评价与日常运维的联动机制，例如将评价结果自动关联至巡检任务清单，或触发特定阀门的自动化调试程序，确保风险管控措施及时嵌入实际操作。

2.5 监控与数据采集技术

天然气管道的安全运行离不开对输送状态的实时感知与全局把控。从压力波动到温度变化，从管体形变到外界干扰，每项参数的细微异常都可能演变为重大隐患。监控与数据采集技术通过多维感知、高效传输与智能分析，能够将分散的物理信息转化为可决策的安全信号，支撑起从日常运维到应急响应的全链条管理。

现代管道监控体系以数据采集与监控系统为核心，集成压力、流量、温度等关键参数的实时监测功能，部署在管道沿线的传感器网络，每秒采集数千条数据并传输至控制中心，结合阈值预警与趋势分析算法，快速识别压力骤降、流量异常等潜在风险。例如，当某段管道因第三方施工导致应力突变时，系统可自动触发声光报警，联动关闭邻近截断阀，同时向巡检人员发送定位信息，大幅缩短人工排查时间。

数据采集的精准性与时效性层面，应用光纤传感技术的应用突破传统点式监测的局限，利用铺设于管道外壁或伴行光缆中的光纤，实现应变、振动、温度等参数的连续空间测量。同时，结合分布式声波传感技术，可捕捉管道周边机械挖掘、滑坡位移等威胁行为产生的振动信号，通过频谱分析区分正常环境噪声与入侵事件，提升第三方破坏的预警能力。此外，智能清管器定期在管道内部运行，搭载漏磁检测、超声探伤等模块，生成管壁缺陷的毫米级三维图像，为完整性评价提供高精度数据基础。

3 天然气管道输送安全技术的最新进展

近年来，天然气管道安全技术在多学科交叉融合的推动下，呈现出智能化、集成化与主动防御的演进趋势。通过新材料研发、数据驱动决策及自主化装备的应用，管道安全管理的精度与效率显著提升，逐步从“事后处置”转向“事前预防”，为能源动脉的长周期安全运行注入新动能。

3.1 智能化监测技术迈向全面感知

传统单一传感器监测正被多维感知网络取代。分布式光纤声波传感技术通过解析管道振动信号，不仅能实时捕捉泄漏、第三方施工等异常事件，还可识别管道内介质流动状态，判断水合物沉积风险^[4]。同时，卫星遥感与合成孔径雷达技术的大规模应用，实现了对地质灾害区域地表毫米级形变的持续监测，结合管道应力模型预测管体变形趋势，提前预警滑坡、断层位移等威胁。智能清管器的升级迭代同样亮眼，新一代设备搭载自主导航与避障系统，可在复杂管段内精准定位缺陷，并通过边缘计算实时压缩传输检测数据，大幅缩短分析周期。

3.2 材料与防护技术向功能化升级

管道材料创新聚焦于环境适应性与自修复能力。例如，纳米改性涂层通过嵌入缓蚀剂微胶囊，在涂层局部破损时可自动释放活性物质，形成临时保护膜；形状记忆合金应用于管道连接件，在极端温度或应力下可恢复预设形态，避免法兰泄漏。阴极保护技术亦向动态优化迈进，基于物联网的智能阴保系统可根据土壤湿度、杂散电流强度等参数自主调节输出电流，解决传统恒电位模式下的过保护或欠保护问题。此外，适用于超低温环境的增强热塑性复合管逐步推广，其抗冻胀与抗疲劳性能为高寒区域管道建设提供了新选择。

3.3 数字孪生驱动风险防控模式革新

数字孪生技术的深度应用，构建起物理管道与虚拟模型的实时交互通道。通过集成SCADA监测数据、内部检测报告及外部环境信息，孪生体可动态模拟不同工况下的管道状态，预演腐蚀扩展、应力集中等风险演化路径。例如，在台风或地震预警期间，系统通过仿真推演管道的极限承载能力，自动生成压力调控、支墩加固等处置方案，辅助管理人员优化应急响应策略。此外，机器学习算法在风险预测中扮演关键角色，通过对历史事故数据的特征挖掘，建立区域性风险画像，实现高风险管段的靶向防控^[5]。

4 结束语

天然气管道安全技术的持续革新，标志着能源输送体系从被动防御向主动防控的跨越。通过腐蚀防护、泄漏修复、数字孪生等技术的深度融合，逐步构建起覆盖全生命周期的多维安全屏障。未来，随着智能化感知、自修复材料及低碳技术的突破，管道系统将向更高韧性、更低风险的方向演进，为全球能源供应安全与绿色转型提供坚实支撑。

参考文献：

- [1] 张刚,孙启超,钟炎鑫,等.天然气管道输送安全关键技术与进展研究[J].石化技术,2024,31(10):260-262.
- [2] 李雨琼,董雨茜.天然气管道输送安全关键技术与进展[J].当代化工研究,2024(06):194-196.
- [3] 王洋龙.天然气管道输送的自动控制和管理措施[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(11):70-72.
- [4] 廖倩玉,陈志光.天然气管道掺氢输送安全问题研究现状[J].城市燃气,2021(04):19-26.
- [5] 杨鹏博.天然气管道输送与管理[J].化学工程与装备,2018(04):66-67.

作者简介：

梁二伟（1987-），男，汉族，吉林长春人，本科，中级工程师，研究方向：城市燃气管理。