

天然气管道输送安全关键技术与进展研究

郭东升（巴州中石油昆仑燃气有限公司，新疆 库尔勒 841000）

摘要：随着全球能源需求的增长与结构调整，天然气作为清洁能源在能源体系中的地位日益凸显，其管道输送的安全性愈发关键。本文围绕天然气管道输送安全关键技术展开探讨，详细介绍了高压式输送安全技术、掺氢式输送安全技术、大口径管道输送技术、多相流输送安全技术以及液化天然气运输技术，同时介绍了物联网、人工智能和新型材料在管道输送中的应用，全方位为天然气管道输送的安全运行提供保障。

关键词：天然气；管道输送；安全；关键技术；进展

0 引言

天然气作为一种清洁、高效的化石能源，其战略地位日益凸显。随着能源需求的持续攀升以及环保诉求的愈发迫切，天然气的开发与利用规模不断扩大，管道输送成为被广泛应用的天然气运输手段之一。从地缘政治到日常生活，天然气管道纵横交错，编织起庞大的能源供应网。探索天然气管道输送安全关键技术成为保障能源供应稳定、生态环境安全以及社会经济平稳发展的关键着力点，能够为天然气管道输送的高效、稳定运行保驾护航。

1 天然气管道输送安全关键技术类别

1.1 高压式输送安全技术

高压式输送安全技术是天然气管道输送的关键技术之一，在现代能源运输体系中发挥着举足轻重的作用，其主要是提高管道内天然气的输送压力，以此来实现大规模、远距离、高效率的能源传输。在天然气被压缩至高压状态时，其单位体积内的气体分子数量增多，气体密度大幅增加，从而在相同管径的管道内，能够输送更多的天然气量，这不仅有助于充分利用管道资源，降低单位输送成本，还能高效满足人们日益增长的能源需求，并在保障管道运行安全方面具有显著优势。高压输送能够使天然气流速相对稳定，减少因流速不均而引发的管道振动。在长距离输送过程中，过度的管道振动容易造成管道连接处松动、焊缝疲劳开裂等安全隐患，而稳定的流速能够有效规避此类问题，确保管道结构的完整性。而且在高压环境下，天然气中的杂质、水分更易于凝结和分离^[1]。通过在管道沿线合理设置分离装置，能够及时将这些潜在的腐蚀源去除，降低管道内壁被腐蚀的风险，进而延长管道使用寿命，使得进入管道主体的天然气纯度大幅提高。

1.2 掺氢式输送安全技术

所谓掺氢输送技术，是指在充分利用现有天然气

管道基础设施的前提下，将氢气以合适的比例混入天然气中，协同完成输送任务。氢气的掺入改变了管道内流体的物理化学特性，氢气与天然气（甲烷）性质对比表，如表1所示。氢气密度低、分子小、扩散系数大，使得混合气体在管道内的流动状态相较于纯天然气更为复杂，但氢气具有高燃烧值，在掺入天然气后，能够有效增加混合气体的能量密度，在一定程度上提升单位体积气体的输送效能，减少输送同等能量所需的气体量，进而降低管道长时间高压运行带来的安全风险，减轻管道承压负担。适量掺氢可改变气体的可燃范围与爆炸极限，通过调配不同的掺氢比例，能够优化天然气的燃烧特性。并且在特定的掺氢比例下，混合气体的爆炸下限会提高，因此气体在管道内发生爆炸的风险概率会降低，从而为管道运输营造相对安全的环境。在应对管道泄漏时，由于氢气自身的快速扩散特性，一旦发生泄漏，氢气能够迅速在空气中稀释，阻止可燃混合气团的形成，大幅缩短危险状态的持续时间，降低因泄漏引发火灾或爆炸事故的危害程度，为及时检测与修复泄漏点争取宝贵时间^[2]。

表1 氢气与天然气（甲烷）性质对比表

性质	氢气	甲烷
相对分子质量	2.016	16.043
气体常数 / [J·kg·K] ⁻¹	4.125	518
密度 (15°C) / (kg·m ⁻³)	0.0852	0.6801
低热值 / (MJ·m ⁻³)	10.23	34.04
高热值 / (MJ·m ⁻³)	12.09	37.77
运动黏度 / (10 ⁶ ·m ² ·s ⁻¹)	93.0	14.5
动力黏度 (0°C) / (10 ⁶ ·kg·m ⁻² ·s)	0.852	1.06
扩散系数 (0°C) / (10 ⁴ ·m ² ·s ⁻¹)	0.611	0.296
最低着火温度 / °C	400	540
最小点火能 / (10 ⁻⁸ kJ)	1.511	29.010
爆炸极限 / %	18.2~58.9	5.7~14.0

1.3 大口径管道输送技术

大口径管道是指管径达到一定规模，如常见的管径在 1000mm 及以上的管道。在天然气长距离大规模输送过程中，大口径管道输送技术发挥着关键效能。相较于中小口径管道，大口径管道凭借其更宽阔的内部空间，能够一次性输送更为庞大体积的天然气，极大地提升了输送效率。以一条管径 1200mm 的天然气管道为例，相较于管径 800mm 的管道，在相同压力与流速条件下，其输送能力可以提升 50% 甚至更高。大口径管道输送技术不仅显著提升了输送效能，还在经济效益与资源利用层面展现出卓越的优势，其减少了管道铺设数量，降低了建设成本。在规划长距离输送路线时，大口径管道凭借单管的强大输送力，能够替代多条中小口径管道，节省管材购置、施工人力、土地占用等诸多开支。

从能源损耗视角来看，大口径管道因内部流体阻力相对较小，使得天然气在输送过程中的压力损失减少，进而降低了为维持输送压力所消耗的能源，提升了能源输送的实际利用率。而在最重要的安全层面，大口径管道的管壁相对更厚，因此管道自身具备更强的抗压、抗冲击能力，能够有效抵御外部地质灾害如地震、山体滑坡等对管道造成的挤压、扭曲等破坏，为天然气的稳定传输筑牢“第一道防线”。

1.4 多相流输送安全技术

天然气从开采源头到终端用户，并非始终处于单一气相状态，常伴有液态水、液态烃以及固体杂质等，形成气液固多相混合流动，这便是多相流输送技术所针对的应用场景。多相流输送安全技术需要运用先进的多相流模拟软件，精准预测不同工况下多相流的流动形态、积液分布以及水合物形成趋势，依此优化管道的走向、坡度与管径，尽量减少液体的积聚和水合物的生成。

同时配套安装高效的分离设备，如旋风分离器、过滤分离器等，置于管道沿线关键节点，将液体和固体杂质从天然气中分离出来，降低多相流的复杂性，并采用化学药剂，向管道内注入醇类、抑制剂等药剂，抑制水合物的形成，或者利用加热、减压等物理方法，使已形成的水合物分解，确保天然气能在多相流状态下安全、平稳地通过管道输送至千家万户。

1.5 液化天然气运输技术

液化天然气（LNG）运输技术核心在于将气态天然气冷却至约 -162℃，使其液化，体积大幅缩小至气

态时的 1/600，这一特性为远距离、跨区域运输带来了诸多便利。从运输前期准备而言，液化工厂承担着关键任务，其需要配备先进的制冷系统确保天然气的高效液化，且在储存环节特制的低温储罐既要维持超低温环境、防止热量侵入导致 LNG 气化，又要具备高强度结构以承载液态天然气的重压，保障储存安全。在输送环节，专用的 LNG 运输船成为海上运输主力。这些船舶采用双层船壳设计，内壳承载 LNG，外壳抵御海浪冲击、碰撞等外力，中间填充隔热材料，最大限度减少热量传递，防止 LNG 过快升温气化引发安全风险。

同时船上安装有精密的温度、压力监测系统，实时掌控 LNG 状态，一旦出现异常及时预警并启动应急预案。在管道输送与之衔接时，接收终端的电气化设施通过海水或空气作为热源，使 LNG 重新气化，之后接入陆地天然气管道网络继续传输。在此过程中，气化速率的精准调控既能满足下游管道的输气需求，又能避免因气化过快产生超压冲击管道；电气化装置的安全联锁设计，可以在温度、压力、流量等参数偏离正常范围时，迅速切断气源，自动启动保护程序，全方位保障从液化、运输到管道接入的整个流程安全、顺畅，为天然气的多元输送筑牢根基。

2 天然气管道输送安全关键技术进展

2.1 物联网在管道输送中的应用

随着科技的飞速发展，物联网被广泛应用于天然气管道输送领域，为传统输送模式带来了革新性转变，开启了智能化安全输送的新篇章。通过在管道沿线密集部署各类传感器，比如压力传感器、温度传感器、流量传感器、振动传感器以及气体泄漏探测器等，能够实时采集管道运行的关键数据。这些传感器依托物联网强大的通信能力，将海量的数据即时传输至监控中心，工作人员得以 24 小时全方位掌握管道动态，实现可视化管理，为天然气安全输送提供保障。智能阀门控制系统也是物联网的一大应用^[3]。传统阀门操作依赖人工现场执行，而如今依托物联网，操作人员可远程监控与操控阀门。

当遭遇紧急情况，比如管道破裂压力骤降，监控中心能即刻下达指令关闭相应阀门，切断气源，最大程度减小危险扩散范围。像高压式输送、大口径管道输送等都可以应用物联网技术来增加输送的安全性。在高压输送场景下，物联网传感器能够实时监测管内高压状态，细微压力变化都逃不过其“敏锐感知”，

一旦压力接近临界值，自动化调控系统能够立即响应，调节泵站运行参数，确保压力稳定在安全区间，杜绝因高压引发的管道破裂风险。对于大口径管道，借助安装在管道内壁的微型探伤传感器，能够定期扫描管壁厚度、焊缝质量等关键指标，通过数据分析提前预判管道腐蚀、磨损状况。

当发现潜在缺陷，依托物联网构建的智能管理平台，能够迅速调配维修资源，制定针对性修复方案，防止缺陷恶化导致泄漏事故。不仅如此，物联网还促进了不同区域管道输送系统间的互联互通。通过数据共享，各段管道的运行信息能够进行汇总整合，实现跨区域协同安全管理。

2.2 人工智能助力管道安全输送

在天然气管道输送中，人工智能成为保障安全的核心力量。基于人工智能的图像识别技术，被广泛应用于管道外部环境监测。人工智能驱动的预测性维护模型更是能够整合海量历史数据，包括管道材质特性、运行工况、维修记录等，运用机器学习算法对管道未来状态进行深度模拟预测，精确定位潜在故障点，合理安排维护计划，变被动抢修为主动预防，极大减少意外停机次数，确保天然气持续稳定输送。

在多相流输送中，流体的复杂性使流动状态监测困难重重，而人工智能凭借其强大的数据分析能力，通过对管道内压力、温度、流速等多参数的实时监测与深度分析，精准判别多相流的相态分布、流型变化，提前洞悉可能出现的堵塞、冲蚀风险，进而智能调控输送参数，确保混合流体平稳、高效输送。而液化天然气因其对储存环境要求严苛，人工智能的作用愈发凸显。

智能温控系统利用 AI 算法，依据实时采集的储罐温度、外界气候等数据，自动精准调节制冷装置，严格维持低温状态，防止 LNG 气化引发超压危险。同时在运输船舶、槽车的行驶过程中，基于人工智能的导航与监控系统能够实时优化路线，避开拥堵、地质灾害路段，全方位保障运输安全，让液化天然气能够安全、准时抵达目的地，满足能源需求。

2.3 利用新型材料提升管道性能

传统的天然气管道多采用碳钢材质，随着输送需求的日益增长，复杂工况加剧，新型材料应运而生。高强度、韧性合金钢相较于普通碳钢，屈服强度大幅提升，能承受更高的内部压力，从而有效降低管道在高压运行下破裂的风险，即使面对地质运动、第三

施工碰撞等外力冲击，也具备更强的抗变形能力，保障天然气稳定输送。因为大口径管道输送技术在高压环境下使用，所以一般采用高强度、高韧性合金钢，如 X80、X100 钢级材料，防止管道在高压下发生破裂、变形。

从防腐角度看，新型的复合材料涂层能够高效阻挡外界水汽、腐蚀性介质与管道内壁接触，极大延缓腐蚀进程，相比传统防腐涂层，使用寿命显著延长，减少了因腐蚀导致的管道泄漏隐患^[4]。掺氢式输送安全技术因为氢气的化学活性比较强，能够加剧管道内壁的腐蚀风险，尤其是在高温高压环境下，这种腐蚀作用更为显著，所以为了保障掺氢输送安全，在管道材料上，一般采用适配氢气环境的新型合金管材或对现有管材进行改性处理，增强其抗氢脆、抗腐蚀能力。像 2.25Cr-1Mo 钢种改良型，其晶体结构优化，能够有效阻止氢气渗透、降低氢脆风险，适应含氢混合气体复杂的化学环境，保障掺氢输送过程管道完整性。而随着环保要求的不断增加，可回收利用的新型管道材料也在加速研发，既要满足当下天然气输送性能的需求，又为未来管道更新换代、资源可持续利用铺就道路，全方位推动天然气管道输送迈向更安全、更高效的新阶段。

3 结束语

综上所述，天然气管道输送安全关键技术的运用为能源的稳定供应奠定了坚实基础。从高压、掺氢、大口径、多相流输送技术到液化天然气运输技术，各有其独特优势与适应性，满足了不同场景需求。而物联网、人工智能及新型材料的融入，更是开启智能化、高效化、安全化新篇章，守护能源动脉畅通无阻，助力全球能源事业稳健发展。

参考文献：

- [1] 张刚,孙启超,钟炎鑫,方超,庄学良.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] 丁建林,西昕,张对红.能源安全战略下中国管道输送技术发展与展望[J].油气储运,2022,41(06):632-639.
- [4] 郑旭.浅谈天然气输送管道铺设施工的安全技术[J].低碳世界,2018(01):359-360.