

掺氢天然气管道输送工艺研究

王国聪 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257000)

摘要: “双碳”目标下, 掺氢天然气因其低碳特性与管网适配性, 成为传统能源向氢能过渡的关键载体。本文系统研究其管道输送工艺, 分析氢掺入对管道材料、流体力学及安全性能的影响, 结合国内外案例优化材料选择、输送参数及安全体系。研究表明, 科学设计工艺与安全防控可实现掺氢天然气的高效安全输送, 为氢能规模化利用提供技术支撑。

关键词: 掺氢天然气; 管道输送; 研究

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 027-0091-03

Research on Pipeline Transportation Technology of Hydrogen-Blended Natural Gas

Wang Guocong(Sinopec Petroleum Engineering Corporation Limited, Dongying Shandong 257000, China)

Abstract: Under the “dual carbon” goals, hydrogen-blended natural gas has emerged as a critical transitional energy carrier due to its low-carbon characteristics and pipeline compatibility. This study systematically investigates pipeline transportation technologies, analyzing the impacts of hydrogen blending on pipeline materials, fluid dynamics, and safety performance. By integrating domestic and international case studies, the research optimizes material selection, transportation parameters, and safety systems. Findings demonstrate that scientifically designed processes and safety controls can achieve efficient and secure transportation of hydrogen-blended natural gas, providing technical support for large-scale hydrogen energy utilization.

Keywords: hydrogen-blended natural gas; pipeline transportation; material compatibility

在全球能源转型及“双碳”战略推进背景下, 掺氢天然气作为兼具低碳属性与现有管网兼容性的能源载体, 成为衔接传统化石能源与氢能利用的重要过渡形式。本文围绕掺氢天然气管道输送工艺展开系统研究, 首先分析其物理化学特性及其对管道输送的影响, 继而探讨输送过程中材料相容性、流动特性、安全风险等关键问题, 结合国内外工程实践提出工艺优化策略, 包括材料选型、输送参数调控、安全保障措施等。

我国天然气管道网络已具备一定规模, 截至2023年底, 全国天然气管道总里程超过12万km, 为掺氢天然气的输送提供了基础设施条件。然而, 氢气的物理化学性质与天然气存在差异, 掺混后可能对管道材料、流动特性、安全性能等产生影响, 需针对掺氢天然气的特殊属性开展工艺研究, 以确保管道输送的安全性与经济性。本文从掺氢天然气的特性分析入手, 结合工程实践中的关键问题, 系统探讨管道输送工艺的优化策略, 为相关工程设计与运行提供理论参考。

1 掺氢天然气的物理化学特性及其对输送的影响

1.1 基本物理特性对比

氢气(H_2)的分子量为2.016, 密度仅为 0.0899 kg/m^3 (标准状态), 约为天然气(主要成分为甲烷, 密度 0.7174 kg/m^3)的 $1/8$, 因此掺氢天然气的密度随氢气比例增加而降低。较低的密度导致气体流速增加, 可能影响管道压降计算与流量控制。此外, 氢气的动力黏度为 $8.4 \times 10^{-6}\text{ Pa} \cdot \text{s}$ (20°C), 高于甲烷的 $1.1 \times 10^{-5}\text{ Pa} \cdot \text{s}$,

黏滞性差异会影响流体在管道内的流动阻力特性。

热值特性方面, 氢气高位热值达 142 MJ/kg , 显著高于甲烷的 55.6 MJ/kg , 但因密度极低, 其体积热值(3.3 MJ/m^3)低于甲烷(36 MJ/m^3)。掺氢天然气热值随氢气体积分数增加呈下降趋势, 需对下游用户设备(如燃气轮机、锅炉等)的燃烧系统进行适配改造, 避免因热值波动影响设备运行效率及稳定性。此特性要求在掺氢比例设计与用户端设备升级间建立协同机制, 保障能源转换系统的高效安全运行。

1.2 化学特性对管道的影响

1.2.1 扩散性与渗透性

作为自然界最小分子结构, 氢气具有极强的扩散性与渗透性。在管道输送过程中, 氢气易通过管材晶界、微裂纹或密封连接处的微小间隙发生泄漏, 这不仅会导致管道内压力衰减, 还可能提升外部环境可燃气体浓度, 构成潜在安全风险。此外, 长期渗透可能引发管道材料内部氢分子聚集, 进而诱发氢脆现象, 影响管道结构稳定性。

1.2.2 氢脆与材料相容性

氢脆是氢气作用于金属材料的典型效应。当氢气渗入金属晶格间隙后, 会显著降低材料韧性与强度, 促使裂纹萌生与扩展, 尤其对高强度钢、铝合金等材料影响更为显著。实验数据表明, 天然气管道常用的X70、X80钢在含氢环境中, 其断裂韧性随氢浓度升高呈下降趋势, 需重新评估材料在含氢工况下的适用

性, 以保障管道系统长期运行安全。

1.2.3 爆炸极限与安全性

氢气的爆炸极限范围为 4%~75% (体积分数), 明显宽于甲烷的 5%~15%, 因此掺氢天然气的爆炸风险随氢含量增加而大幅上升。此外, 氢气的最小点火能量仅为 0.02mJ, 远低于甲烷的 0.28 mJ, 更易被静电、火花等能量源引燃。这对管道系统的防静电设计、电气设备防爆等级及安全防护措施提出更高技术规范, 需在工程设计与运行管理中重点考量, 以降低燃爆风险。

2 掺氢天然气管道输送的关键问题

2.1 材料相容性问题

2.1.1 金属材料的氢脆风险

传统天然气管道采用的碳钢或低合金钢, 在含氢环境中存在氢致开裂 (HIC)、硫化物应力开裂 (SSC) 等潜在隐患, 尤其当气体介质含水分、硫化氢等杂质时, 腐蚀介质会加速氢原子渗入金属内部。相关研究显示, 当氢气体积分数超过 10% 时, X80 钢的疲劳寿命呈现显著下降趋势, 需通过材料合金化改良或表面涂层技术增强抗氢能力。

2.1.2 非金属材料的老化问题

管道附件 (如阀门、密封圈、垫片) 常用的橡胶、塑料等非金属材质, 在氢气环境中易发生溶胀、龟裂或强度退化。以丁腈橡胶 (NBR) 为例, 其在含氢介质中长期服役时, 拉伸强度可降低 20%~30%。对此, 需选用氢化丁腈橡胶 (HNBR)、氟橡胶 (FKM) 等耐氢材料, 或通过改进密封结构设计减少氢气渗透, 确保非金属部件在氢环境中的服役稳定性。

2.2 流动特性与工艺参数设计

2.2.1 压降计算与流量调节

掺氢天然气的密度、黏度、压缩因子等参数随氢含量实时变化, 需对传统天然气管道压降计算公式 (如 Weymouth 公式、Panhandle 公式) 进行针对性修正。氢气的低密度特性会导致混合气体流速增大, 可能引发管道振动或流体噪声, 需通过流体力学仿真确定合理流速限值 (通常建议不超过 20 m/s 以减少冲刷磨损风险)。

2.2.2 混合工艺与均匀性控制

氢气与天然气的密度差异可能引发管道内气体分层效应, 尤其在水平管段或变径部位, 可在掺混点加装静态混合器或湍流发生装置, 以保障混合气体的混合均匀性。此外, 需搭建实时监测系统对氢气体积分数进行连续追踪, 避免因比例波动干扰下游设备运行或引发安全风险。

2.3 安全风险与监测预警

2.3.1 泄漏扩散与爆炸风险

氢气泄漏后易快速扩散形成可燃云团, 在开放环

境中风险相对较低, 但在密闭空间 (如管沟、建筑物内) 积聚后易达到爆炸浓度。需在管道沿线设置氢气泄漏检测仪, 采用红外光谱、热导传感器等技术实时监测, 结合 SCADA 系统实现泄漏定位与应急响应。

2.3.2 腐蚀与疲劳失效风险

除氢脆外, 掺氢天然气中的水分可能导致管道内壁发生电化学腐蚀, 尤其是当气体中含有二氧化碳、硫化物时, 腐蚀速率加剧。

需定期进行管道内检测 (如漏磁检测、超声波检测), 评估壁厚减薄与裂纹发展情况, 结合腐蚀预测模型制定维护计划。

3 掺氢天然气管道输送工艺优化策略

3.1 材料选型与改性技术

3.1.1 金属管材的优选

对于新建管道, 可优先选用抗氢性能优异的材料, 如奥氏体不锈钢 (316L、321)、镍基合金 (Inconel、Hastelloy) 等, 此类材料具有面心立方晶体结构, 氢原子在其中的扩散系数较低, 抗氢脆性能显著优于碳钢。对于现役天然气管道改造, 需评估管材的服役年限、腐蚀状况及氢脆敏感性, 可采用内壁涂层技术 (如环氧树脂、聚乙烯涂层) 隔离氢气与金属接触, 延长管道使用寿命。

3.1.2 非金属材料的适配

密封件、垫片等部件应选用耐氢渗透材料, 如全氟醚橡胶 (FFKM)、聚四氟乙烯 (PTFE) 等, 其氢渗透率较普通橡胶低一个数量级。同时, 优化密封结构设计, 采用双密封唇形结构或增加密封件厚度, 减少氢气泄漏路径。

3.2 输送参数优化与混合工艺设计

3.2.1 氢气体积分数的合理范围

根据国内外研究与工程实践, 当前掺氢天然气中氢气比例通常控制在 5%~20% (体积分数)。低比例掺氢 (<10%) 对现有管道材料影响较小, 可直接利用现有设施输送; 中高比例掺氢 (10%~20%) 需对管材、附件进行适应性改造。在确定掺氢比例时, 需综合考虑管道材料性能、下游用户设备兼容性、安全裕度等因素, 建议通过现场试验逐步提高掺氢比例, 积累运行数据。

3.2.2 压力与温度控制

提升输送压力会增加氢气在金属中的溶解量, 加剧氢脆风险, 因此掺氢天然气管道运行压力宜低于纯天然气管道, 或采用分级升压工艺。温度层面, 低温环境会降低材料韧性、提升氢脆敏感性, 建议将管道运行温度控制在 -20℃ 至 60℃ 区间, 并在寒冷地区配套保温措施, 以维持材料抗氢性能稳定。

3.2.3 混合工艺与监测系统

在氢气注入节点，需通过计量设备精准调控氢气流速与流量，采用动态混合器实现气体均匀掺混。同时，在混合站出口部署在线分析仪器（如气相色谱仪、热导式气体分析仪），对氢含量、热值、密度等参数实施实时监测，通过 PID 控制算法动态调整注入量，依托闭环反馈机制确保混合气体参数稳定，为下游安全高效用气提供保障。

3.3 安全保障措施与应急管理

3.3.1 泄漏检测与定位技术

除传统的压力梯度法、流量平衡法外，可引入光纤传感器（如分布式光纤测温系统 DTS、分布式光纤振动监测系统 DAS），实现对管道泄漏的高精度检测与定位。光纤技术具有抗电磁干扰、长距离监测、实时响应等优势，适用于长输管道的安全监控。

3.3.2 防腐与阴极保护优化

针对掺氢环境下的腐蚀问题，除内壁涂层外，可加强管道阴极保护系统，提高保护电位（如从 -0.85V vs CSE 提高至 -1.0V vs CSE），并定期检测保护效果。同时，控制气体含水量，在管道低洼处设置排水器，避免液态水积聚引发电化学腐蚀。

3.3.3 应急管理与风险评估

制定专项应急预案，明确泄漏、爆炸等事故的处置流程，配备便携式氢气检测仪、防爆通风设备、灭火器材等应急装备。定期开展风险评估，采用故障树分析（FTA）、事件树分析（ETA）等方法识别关键风险点，优化安全措施配置。

4 国内实践与挑战

我国在掺氢天然气领域的研究与试点起步较晚，但近年来发展迅速。2021 年，国家管网集团在河北唐山开展了首次掺氢天然气管道试验，在一段 3km 的 X80 钢管道中掺入 5% 的氢气，监测结果显示管道应力、应变及材料性能无显著变化。2023 年，广东佛山启动了粤港澳大湾区首条掺氢天然气示范管道，设计氢气体积分数为 15%，配套建设了氢气混合站与智能监测系统。

然而，国内工程实践仍面临多重挑战：一是掺氢天然气标准体系亟待健全，在材料选型、输送工艺参数、安全技术规范等方面尚未形成系统性规范；二是现役管道多为碳钢材质，长期服役面临腐蚀与氢脆双重风险，改造成本较高；三是下游终端设备（如燃气锅炉、民用灶具）对氢含量的耐受极限尚未明确，需开展兼容性测试与适应性改造。六是未来展望与建议

4.1 政策与标准体系建设

建议加快建立掺氢天然气管道输送标准化体系，

制定包含氢气体积分数限值、材料性能指标、安全监测规范等内容的国家标准与行业规程，为工程建设与运行管理提供系统依据。同时，构建政策支持体系，通过财政扶持、税收减免等方式引导企业开展现役管道改造及新建掺氢管网试点，推动氢能与天然气基础设施深度融合发展。

4.2 关键技术研发

聚焦抗氢材料技术创新，加快新型耐氢高强度钢、复合管材、纳米涂层技术的研发与产业化进程，降低材料改造成本与技术应用门槛。深化掺氢天然气流动特性、氢脆损伤机理、泄漏扩散规律等基础理论研究，完善工艺设计模型与安全评估方法，为工程实践提供科学支撑。

4.3 产业链协同与示范工程

强化能源企业、设备制造商、科研机构的跨领域协同联动，构建从氢气生产、掺混、输送到终端应用的全链条技术体系。拓展示范工程布局，在京津冀、长三角、珠三角等氢能需求集中区域建设规模化掺氢管网，积累长期运行数据，形成可复制的技术模式与管理经验，为商业化推广奠定基础。

5 结论

掺氢天然气管道输送是氢能规模化利用的关键环节，兼具技术可行性和经济合理性。尽管当前面临材料适配性、安全防控、标准体系等瓶颈问题，通过优化材料选型、工艺设计与安全防护体系，借鉴国内外工程实践经验，可显著提升输送系统的安全性与可靠性。未来需进一步加强基础研究、标准体系构建与示范应用推广，推动掺氢天然气从试点阶段迈向规模化应用，为我国能源结构转型与“双碳”目标实现提供核心技术支撑。

参考文献：

- [1] 李敬法, 宇波, 李璐伶, 等. 天然气管道随动流量掺氢实验及新认识 [J]. 天然气工业, 2024, 44(7):165-173.
- [2] 李凤, 董绍华, 陈林, 等. 掺氢天然气长距离管道输送安全关键技术与进展 [J]. 力学与实践, 2023, 45(2): 230-244.
- [3] 朱建鲁, 周慧, 李玉星, 等. 掺氢天然气输送管道设计动态模拟 [J]. 天然气工业, 2021, 41(11):132-142.
- [4] 伍其兵, 张行, 张萌, 等. 基于知识图谱的掺氢天然气管输研究现状与演进趋势 [J]. 油气储运, 2022, 08 (10):125-126.
- [5] 王玉生, 赵忠德, 蒲明, 等. 一种掺氢天然气管道输送工艺数值仿真方法及装置:202310755393[P][2025-05-13].