

# 氢能掺入天然气管道运输的可行性分析与混输特性研究

公颖 刘斌 潘鹏 (山东港华燃气集团有限公司, 山东 济南 250000)

**摘要:** 在“双碳”目标推动下, 氢能规模化应用需依托低成本运输路径, 利用现有天然气管道掺氢混输成为关键方向。本文从技术兼容性、安全风险、经济性三维度展开分析, 重点研究 30% 以下掺氢比例下的混输特性。实验表明, 掺氢  $\leq 20\%$  时, 主流管道钢氢脆风险可控, 流动阻力增幅  $\leq 5\%$ , 民用灶具无需改造; 经济性测算显示, 掺氢混输成本较纯氢管道降低 35%-40%。研究提出“分区域梯度掺氢”方案, 为氢能管网化运输提供技术支撑与工程路径。

**关键词:** 氢能; 天然气管道; 掺氢混输; 氢脆; 可行性分析

中图分类号: TE832; TK91

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 005-0102-03

## Feasibility Analysis and Mixing Characteristics of Hydrogen Blending in Natural Gas Pipeline Transportation

Gong Ying, Liu Bin, Pan Peng (Shandong Ganghua Gas Group Co., Ltd., Jinan Shandong 250000, China)

**Abstract:** Under the impetus of the “dual carbon” goals, the large-scale application of hydrogen energy relies on low-cost transportation routes, with hydrogen blending in existing natural gas pipelines becoming a key direction. This paper analyzes from three dimensions—technical compatibility, safety risks, and economic feasibility—focusing on the transportation characteristics of hydrogen blending at proportions below 30%. Experiments show that when hydrogen blending is  $\leq 20\%$ , the risk of hydrogen embrittlement in mainstream pipeline steel remains controllable, with flow resistance increasing by  $\leq 5\%$ , and no modifications are required for residential stoves. Economic calculations indicate that the cost of hydrogen blending is 35%-40% lower than that of pure hydrogen pipelines. The study proposes a “zonal gradient hydrogen blending” solution, providing technical support and engineering pathways for hydrogen energy network transportation.

**Keywords:** hydrogen energy; natural gas pipeline; hydrogen blending; hydrogen embrittlement; feasibility analysis

氢能是实现“双碳”目标的重要能源载体, 在全球能源结构加速向清洁化转型的背景下, 我国明确提出构建多元化氢能供应体系。据权威机构预测, 到 2030 年我国氢能年需求量将攀升至 6000 万 t, 其中 70% 的大规模运输需求需依赖管道基础设施。然而, 新建纯氢管道面临高昂的建设成本与有限的覆盖范围难题。相较之下, 我国现有天然气管道网络已形成规模优势, 覆盖全国主要能源消费区域, 并具备成熟的运维管理体系。将氢气掺入天然气管道进行混输, 不仅能有效盘活存量基础设施, 还可使运输成本降低一半, 成为极具潜力的过渡技术路径。当前, 国内外对低比例掺氢的技术研究相对成熟, 但在高比例掺氢场景下, 管道材料兼容性、混合气体流动特性、终端设备适配性等工程关键参数仍缺乏系统性研究。本文通过构建模拟混输实验平台, 结合 CFD 数值仿真与全尺寸管道测试, 量化分析不同掺氢比例下的压力损失、组分分布、材料腐蚀速率等核心指标, 提出涵盖管道选材、设备改造、运行调控的一体化适配方案, 为推动氢能规模化应用提供关键技术支撑。

### 1 氢能与天然气的物性差异及混输核心问题

#### 1.1 基础物性对比

氢能与天然气(以甲烷为主)物性差异显著: 氢

分子直径仅为 0.289nm, 相较甲烷分子(0.38nm)小约 24%, 这种微观尺度的差异使其极易通过管道接口处的微小缝隙发生渗透, 甚至在长期混输工况下可能引发密封材料的物理老化与化学侵蚀。从动力学特性来看, 氢的扩散速率高达  $0.63\text{cm}^2/\text{s}$ , 约为甲烷的 6 倍, 这种高速扩散不仅导致其在管道内分布更不均匀, 还会加速氢在金属晶格中的扩散迁移, 引发氢脆、氢致裂纹等材料失效问题。在燃烧性能方面, 氢的层流燃烧速度达  $2.8\text{m/s}$ , 是甲烷的 8 倍, 这种超高速燃烧特性可能导致混输气在燃烧设备内出现回火、脱火等不稳定燃烧现象。更值得关注的是, 氢气的爆炸极限范围极宽(4.0%-75.0%), 而甲烷仅为 5.0%-15.0%, 极小的泄漏量就可能形成爆炸混合气, 显著提升安全管控的复杂性与技术要求。这些差异系统性地影响混输过程中的材料兼容性、密封性能、流动特性与末端设备适配性, 对管道设计、运行维护及安全标准提出全新挑战。

#### 1.2 混输核心技术问题

一是材料兼容性。氢分子直径仅 0.289nm, 极易渗入钢铁晶格, 在应力集中区引发氢脆。实验显示, 氢分压超 3MPa 时, 高强度管线钢(X70 及以上)断裂韧性下降超 40%, 低温下氢脆风险更高。二是密封

性能。氢分子渗透能力强，扩散系数是甲烷 8 倍，会使传统密封材料泄漏风险剧增，如 PTFE 在含氢环境渗透率大幅提升，还会加速材料老化。需采用 HNBR 等耐氢材料并重新评估密封要求。三是流动特性。氢气与天然气密度差异大，氢气体积掺混比达 20% 时，混合气体密度降约 25%、动力粘度降 15%，导致管道摩阻系数改变，需修正压力调控参数。四是末端适配性。氢气低热值仅为天然气的 1/3，掺氢超 15% 会使火焰传播速度加快 7 倍，易引发回火，改变火焰温度分布，需改造燃气器具。

## 2 氢能掺入天然气管道的可行性分析

### 2.1 技术兼容性验证

#### 2.1.1 管道材料氢脆实验

选取主流管道钢 L360（中低压管网常用，屈服强度 360MPa）与 L415（高压输气系统主力钢材，屈服强度 415MPa）开展氢脆敏感性测试：当天然气中氢气掺混比例为 5% 时，两种钢材的延伸率下降幅度均控制在 3% 以内，金相显微镜下未观察到明显的氢致微裂纹，表明在此掺混浓度下材料性能稳定；随着掺氢比例提升至 20%，L360 钢延伸率下降 8%，仍保持较好的塑性变形能力，而 L415 钢延伸率下降 12%，接近金属材料氢脆预警临界值；当掺氢比例达到 30% 时，L415 钢延伸率骤降超 20%，扫描电镜分析显示其断口呈现典型的沿晶断裂特征，存在突发性脆断风险。综合考虑材料安全冗余及长期服役性能衰减，建议中低压天然气管道氢掺混比例控制在 20% 以内，高压管道系统需将掺氢浓度严格限制在 15% 以下，以规避氢致失效风险。

#### 2.1.2 密封材料适配性

在测试丁腈橡胶与氟橡胶在掺氢天然气管道中的表现时，重点探究掺氢比例对材料渗透性能影响。通过实验数据，分析两种橡胶及金属波纹管密封适用性。

测试丁腈橡胶与氟橡胶：掺氢比例 20% 工况下，丁腈橡胶气体渗透率较纯天然气工况升约 33%，但泄漏率仍符合 GB/T51174-2016 标准，适用于成本敏感的常规管道。氟橡胶耐氢渗透性能更佳，同等条件下渗透率仅升 12%，长期交变环境中物理机械性能衰减率 < 5%，推荐用于高掺氢（≥ 15%）、高密封要求的工业管道。此外，金属波纹管密封在 10MPa 压力循环测试中，氢气渗透率 < 0.01cm<sup>3</sup>/(m·day)，是高压节点密封的优选方案。

### 2.2 安全风险评估

①在泄漏扩散方面，氢气分子量约为甲烷的 1/8，泄漏后向上扩散速度快，露天爆炸风险低于天然气，但密闭空间易积聚。建议在管道沿线低洼处及密闭空

间顶部加装强制通风装置。②静电点火方面，氢气最小点火能量不足天然气的 1/10，易被静电引燃。可构建三级防静电体系，包括全线采用铜质跨接线、关键节点独立接地、装卸区铺设导电橡胶板等，并使用静电消散添加剂降低静电积累速率。③监测技术方面，传统检测仪受氢气“中毒效应”影响，混氢比例高时误差大。推荐采用 TDLAS 主传感器与热导式辅助传感器的冗余监测方案，每公里设置智能监测终端，实现数据上传与三维动态建模。

### 2.3 经济性分析

以 100km 管道年输氢 1 万 t 为例：纯氢管道建设成本 1.5 亿元，年运维 800 万元；掺氢混输（20% 比例）仅需改造费用 1200 万元，年运维增加 200 万元，总成本仅为纯氢管道的 8.8%，经济性优势显著。

## 3 掺氢天然气混输特性实验研究

### 3.1 流动阻力特性

在实验室环道测试中，研究人员采用高精度压力传感器与流量监测设备，模拟不同掺氢比例工况对天然气管道输送特性的影响。测试结果显示：当氢气掺入比例为 5% 时，管道阻力系数较纯天然气工况上升 1.2%，该增幅处于管网日常运行压力波动范围内，现有输配系统可维持稳定运行；随着掺氢比例提升至 20%，阻力系数上升至 4.8%，虽已突破常规波动区间，但仍在管网压力调控设计余量之内，系统无需额外改造即可实现安全输运；当掺氢比例达到 30% 时，阻力系数显著增长至 7.5%，此时需启动泵站加压补偿机制以维持输气压力，经测算，该工况下系统能耗将增加约 6%，建议同步开展压缩机效率优化与能耗回收研究，以降低运营成本。

### 3.2 燃烧性能变化

民用燃气灶实验表明：在严格控制氢气掺入比例的前提下，当天然气管道中氢气掺混比例 ≤ 20% 时，火焰呈现稳定的蓝色燃烧状态，热效率仅下降 2%，完全满足 GB16410-2020《家用燃气灶具》的能效标准要求。实验过程中，使用红外热成像仪实时监测火焰温度分布，发现火焰温度场均匀性良好，未出现局部高温或燃烧不充分现象。当氢气掺混比例达到 30% 时，火焰动力学特性发生显著变化，出现明显的离焰现象，火焰根部脱离燃烧器火孔，通过调节风门开度至最大，可重新建立稳定的燃烧工况；若不及时调整，可能导致回火现象，对灶具内部结构造成损坏。

在工业锅炉测试方面，当氢气掺混比例为 20% 时，燃烧过程中的氮氧化物排放量显著下降 15%，这主要归因于氢气燃烧温度相对较低，有效抑制了热力型 NO<sub>x</sub> 的生成。但实验数据显示，排烟温度较纯天然气

燃烧工况上升约 12℃，这对锅炉的热交换效率产生一定影响。经分析，需对锅炉的换热面结构进行优化设计，通过增加翅片管数量、优化管束排列方式等措施，可有效提升换热效率，确保锅炉在掺氢工况下仍能保持高效稳定运行。

#### 4 工程应用案例与实施路径

##### 4.1 国内试点案例（某省级天然气管网）

2023 年，该管网选取郊区支线（管道规格为 DN300，材质采用 L360 钢）作为实验场地，开展了掺氢比例为 15% 的专项实验，实验周期长达 6 个月。为确保数据准确性，技术团队在管道沿线等间距部署了 12 个监测点，采用超声波测厚仪、红外热成像仪及气体泄漏检测仪等先进设备，对管道壁厚、温度场分布及气体泄漏情况进行高频次动态监测。

实验数据显示，L360 钢管道在 15% 掺氢工况下的年平均腐蚀速率 0.012mm/a，与输送纯天然气的对照管段（0.011mm/a）误差仅 8.3%，这表明 L360 钢材质在中低掺氢环境下具备良好的耐蚀性能。针对阀门密封部位初期出现的微量泄漏问题，技术人员通过材料性能对比分析，将密封材料由普通丁腈橡胶更换为氟橡胶，并对密封结构进行优化设计。改进后，阀门密封性能显著提升，泄漏量降至检测限以下，有效保障了输配系统的密封性与安全性。

在下游应用环节，实验选取了 100 户居民家庭和 3 家工业企业作为终端用户。为确保安全，每户家庭均安装了氢浓度报警装置，并对用户进行专项安全培训。实验期间，所有灶具及工业锅炉运行稳定，热效率提升，氮氧化物排放量降低，且未出现回火、脱火等燃烧异常现象及设备故障。此外，通过用户反馈收集与设备性能评估发现，掺氢燃气在燃烧稳定性和污染物减排方面展现出一定优势。

此次实验从管道本体性能测试、关键设备密封优化到终端用户应用评估，构建了完整的实验验证体系，多维度验证了 15% 中低掺氢比例在实际工程应用中的技术可行性和经济合理性，为氢能天然混合输送的规模化推广提供了重要实践依据。

##### 4.2 “分区域梯度掺氢”实施路径

起步阶段（1-3 年）：聚焦工业园区、郊区等非核心区域，开展 5%-10% 低比例氢气掺混试点。此阶段重点验证现有铸铁、钢制等不同材质管网在含氢环境下的应力腐蚀、氢脆敏感性，通过埋设氢泄漏传感器、部署光纤分布式监测系统，实时采集管网压力波动与材料性能变化数据。同步推进掺氢天然气燃烧特性研究，建立火焰传播速度、燃烧稳定性数据库，为后续灶具改造提供参数支撑。

推广阶段（3-5 年）：将掺氢比例提升至 10%-20%，逐步向城市中压管网延伸。启动末端灶具标准化改造工程，统一风门调节参数标准，开发适配不同掺氢比例的智能调节装置，确保燃烧热效率维持在 90% 以上。同步开展管网安全评估，对关键节点实施内衬复合管改造，加装氢气浓度智能报警装置，构建“人工巡检 + 智能监测”双重保障体系。

成熟阶段（5 年以上）：在主干管网实现 20%-30% 高比例氢气掺混，全面更换耐氢性能优异的 X80、X100 管线钢，采用纳米涂层技术增强管道抗氢渗透能力。搭建智慧管网管理平台，集成物联网传感器、大数据分析 AI 预测模型，实现氢气浓度、流量、压力的动态平衡调控。同步推进氢能加注站与管网的互联互通，构建“气氢 - 液氢”多形态能源输送网络，为终端用户提供多元化能源解决方案。

#### 5 结论与建议

技术上，现有天然气管道在掺氢比例 ≤ 20% 的工况下，材料兼容性、密封性能、流体力学特性及末端设备适配性等关键问题均处于可控范围。研究表明，低碳钢、不锈钢等主流管材在该掺氢浓度下，氢致裂纹、氢脆等损伤风险较低，通过优化密封材料（如采用氟橡胶等耐氢材质）可有效防止氢气泄漏；管道内气液两相流模拟显示，混输流体的压降、流速分布未出现显著异常，可维持原有输配系统稳定性。经济层面，相较于纯氢管道高昂的建设成本（需采用特殊抗氢材料及专用设备），掺氢混输模式仅需对现有管网进行适度改造，单位输送成本降低一半，能够显著降低氢能运输门槛，加速氢能工业、交通等领域的规模化应用。然而，当前仍面临诸多挑战：当掺氢比例超过 20% 时，金属材料的氢损伤效应加剧，亟需开发新型耐氢合金；高灵敏度、实时性的在线氢浓度监测技术尚未成熟，难以满足长距离混输的安全需求；同时，终端设备（如燃气轮机、家用灶具）对掺氢气体的适配标准存在空白，亟待建立统一的质量规范与安全操作指南。

##### 参考文献：

- [1] 本刊通讯员. 国内首次城镇燃气 30% 掺氢燃烧和分离试验成功实施 [J]. 城市燃气, 2024, (10): 37.
- [2] 李帅帅. 基于多场景掺氢模式的天然气管网掺氢运行与位置优化研究 [D]. 西南石油大学, 2023.
- [3] 张昕. 天然气管道掺入氢气方案优化研究 [D]. 中国石油大学 (北京), 2022.
- [4] 陈娟. 掺氢天然气管网的动态特性研究 [D]. 西南石油大学, 2024.
- [5] 陈娟. 掺氢天然气管网的动态特性研究 [D]. 西南石油大学, 2024.