

# 天然气管道掺氢输送工艺探究

王成浩（国家石油天然气管网集团有限公司东北分公司，辽宁 沈阳 110000）

**摘要：**本文先阐述了该技术在解决可再生能源消纳和氢气输运难题方面的重要价值，接着详细剖析了混氢天然气的特性、管网输运关键环节以及国内外示范项目情况。研究认为，尽管混氢天然气管网输运技术展现出一定潜力，但在技术标准、安全性能评估和成本效益等方面仍需进一步研究与完善，以推动该技术的大规模应用和氢能产业的发展。

**关键词：**混氢天然气；管网输运；技术发展状况；难题；安全性能

中图分类号：TE832 文献标识码：A 文章编号：1674-5167 (2025) 021-0069-04

## Research on Hydrogen-blended Natural Gas Pipeline Transportation Technology

Wang Chenghao(Northeast Branch, PipeChina National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd., Shenyang Liaoning 110000, China)

**Abstract:** This paper first elaborates on the significant value of hydrogen-blended natural gas (HBNG) technology in addressing renewable energy integration and hydrogen transportation challenges. It then provides a detailed analysis of the characteristics of HBNG, key pipeline transportation processes, and domestic/international demonstration projects. The study concludes that while HBNG pipeline transportation demonstrates considerable potential, further research and refinement are still required in technical standards, safety performance evaluation, and cost-effectiveness to facilitate large-scale application and advance the hydrogen energy industry.

**Keywords:** hydrogen-blended natural gas; pipeline transportation; technological development status; challenges; safety performance

在全球能源转型的大趋势下，可再生能源发电发展迅速，但弃电问题日益严重。与此同时，氢气作为清洁能源备受瞩目，其大规模输运却面临成本高昂的困境。将氢气混入天然气，借助现有天然气管网进行输运，成为解决上述问题的潜在有效办法。混氢天然气管网输运技术不仅能降低氢气输运成本，还能助力天然气行业向“碳中和”目标迈进，具有重要的战略和经济意义。

然而，这一技术在发展过程中面临诸多难题，如混氢比例对管材的影响、安全事故风险、技术标准缺失等。因此，深入研究混氢天然气管网输运技术的发展与难题，对推动氢能产业发展至关重要。

### 1 混氢天然气管网输运概述

#### 1.1 研究背景与意义

随着可再生能源发电的快速发展，弃电现象愈发突出。据统计，我国部分地区每年弃电量高达数百亿千瓦时。把这些弃电通过电解水制氢，再混入天然气管道输运，既能解决可再生能源消纳问题，又能实现氢气的大规模、长距离输运。与新建纯氢管道相比，利用现有天然气管网混氢输运可大幅降低成本，具有显著的经济和环境效益。

#### 1.2 混氢天然气性质及管网输运关键环节

氢气在物理和化学特性上与甲烷存在显著差异，具体表现为密度较低 ( $0.0899 \text{ kg/m}^3$ )、可燃浓度范

围更广 (4%–75%)、点火能量需求极低 (0.017 mJ) 以及扩散速率快 ( $0.61 \text{ cm}^2/\text{s}$ )。

此类特性导致掺氢天然气的物理属性及燃烧爆炸行为与纯甲烷存在明显区别，其变化幅度直接受氢气掺混比例的影响。以体积能量密度为例，氢气仅为甲烷的三分之一左右 ( $12.75 \text{ MJ/m}^3$  vs  $38.2 \text{ MJ/m}^3$ )，因此掺入氢气会降低输送介质的总热值，进而需调整终端用户的供气量。

在掺氢天然气输配体系中，需重点关注三个核心环节：

①掺混阶段：需通过热力学模拟优化掺氢比例（通常控制在 5%–20%），并采用静态混合器或喷射装置实现气态均匀混合；

②输送阶段：需评估管材氢脆风险、泄漏监测阈值调整及 SCADA 系统适应性改造；

③终端应用阶段：需针对燃气灶具、涡轮机等设备开展燃烧器改造和沃泊指数兼容性验证。

### 2 混氢天然气管网输运关键问题研究进展

#### 2.1 混氢比例

氢气掺混比例的设定受多重技术条件约束，全球尚未形成统一标准，各国限值差异显著：

欧洲：芬兰 (1%)、瑞士 (2%)、奥地利 (4%)、西班牙 (5%) 设定严格阈值；

美国：基于既有设施兼容性，建议采用低浓度掺

氢策略（< 5%）。

中国首例掺氢示范工程——“朝阳可再生能源掺氢项目一期”设定氢气体积分数为 5%，但法规体系尚未明确限值。掺氢比例需基于多维度评估：

### 2.1.1 输配系统

考虑管材氢脆敏感性（如 X80 钢 HIC 指数 > 15% 时风险剧增）、服役年限（≥ 20 年老旧管线限值下调 30%）、区域安全等级（一类地区从严控制）。

### 2.1.2 终端适配

燃气热值波动需控制在 ± 5% 内（沃泊指数适配范围 45–55 MJ/m<sup>3</sup>），燃烧器需改造火孔直径（增大 18%–25%）以匹配氢混气火焰速度（提高 2.1–3.4 m/s）。

### 2.2 管材的适配性

在掺氢天然气高压输运系统中，管道本体、焊接接头、法兰组件及压缩机等关键设施面临双重材料退化风险：氢致脆化（HE）与甲烷致裂反应（HIC）。前者源于氢原子在晶界 / 位错处的偏聚引发延展性损失（塑性下降 ≥ 60%）及滞后断裂；后者因氢与钢中碳元素反应生成 CH<sub>4</sub> 气泡（直径 0.1–5 μm），导致基体脱碳与微裂纹扩展（裂纹密度 > 10<sup>3</sup>/mm<sup>2</sup>），致使材料力学性能不可逆退化（抗拉强度降低 40%–55%）。全球学术界针对此问题展开了系统性研究：

#### 2.2.1 微观机制

采用第一性原理计算揭示氢原子在 α-Fe 晶格中的扩散能垒（0.04 eV）及与空位缺陷的相互作用能（-2.8 eV）；通过透射电镜（TEM）观测到氢致 {100} 解理面比例增加至 78%（纯甲烷环境下仅 12%）。

#### 2.2.2 宏观表征

依据 ASTM G142 标准开展慢应变速率拉伸试验（SSRT），证实 X80 钢在 12 MPa 氢分压下氢脆敏感指数（HEI）由 1.0 激增至 26.4，疲劳循环寿命衰减至基准值的 17%。

#### 2.2.3 材料数据库

美国 SNL 实验室构建含氢环境下 API 5L 钢的 J-R 曲线失效模型，日本 AIST 建立 H<sub>2</sub> 分压 – 裂纹扩展速率 (da/dN) 关联图谱。

### 2.3 泄漏、积聚、燃烧、爆炸等安全事故

混氢天然气在管网输运过程中，受管道腐蚀、设备老化、第三方破坏等因素影响，容易发生泄漏。泄漏后的混氢天然气若积聚，可能引发窒息、燃烧和爆炸等安全事故。因氢气具有低点火能（0.017 mJ）、宽可燃极限（4%–75% vol）及高扩散速率（0.61 cm<sup>2</sup>/s）等特性，掺氢天然气的安全事故特征与纯甲烷体系存在显著差异，其演化机制受掺氢浓度直接影响。例如，掺氢比例提升至 20% 时，泄漏扩散速度增加 1.8 倍，

层流火焰传播速率升至 3.2 m/s。

当前研究存在局限性：

#### 2.3.1 实验数据稀缺

现有成果多基于纯氢管道（如 HyApproval 项目）或理想化模型，缺乏掺氢浓度梯度（5%–30%）的全尺寸试验。

#### 2.3.2 机理研究不足

掺氢天然气 – 空气预混火焰的湍流加速效应（湍流强度 > 40% 时火焰速度提升 4 倍）尚未被充分量化。

#### 2.3.3 应急技术缺口

针对掺氢泄漏的抑爆剂喷射效率下降（氮气惰化需增量 25%），亟需开发适配的应急抢修方案。

未来需构建掺氢浓度 – 事故演化关联模型（如爆炸当量预测公式  $E=1.2H^{0.8}$ ），建立覆盖泄漏、扩散、燃爆的全链条数据库，为工程实践提供技术支撑。

### 2.4 管网的完整性管理

天然气管道的安全可靠运行至关重要，对现役天然气管道进行完整性管理是保障安全的重要措施。与常规天然气管道相比，混氢天然气管道完整性管理需考虑氢气的影响，其完整性评价和管理准则会发生变化。

目前，混氢天然气管道输运处于初步研究阶段，尚无相关标准和规范。在风险评估方面，可借鉴现有天然气管道的评价方法并考虑混氢的影响。例如，依据《埋地钢质管道风险评估方法：GB/T27512—2011》，混氢会影响管道各区段失效可能性得分和失效后果得分中的腐蚀得分、介质的短期危害得分、介质的最大泄漏量得分、介质的扩散性得分和泄漏原因得分等。

在对混氢天然气管道进行安全性能评价和剩余寿命预测时，需考虑氢脆和氢腐蚀对管道缺陷的影响。研究表明，混氢天然气环境中管材的疲劳裂纹扩展速率快于天然气环境，为保证管道不发生断裂失效，混氢天然气管道在裂纹容许尺寸检测规定上应有更严格验收标准。

亟需构建现役天然气管道掺氢输送的风险量化分析框架，重点突破以下方向：

#### 2.4.1 氢浓度 – 风险权重映射模型

通过概率失效模型（如 Weibull 分布）量化氢浓度梯度（5%–30%）对腐蚀速率、氢脆敏感度等风险因子的影响权重（如氢浓度每提升 5%，氢脆风险权重系数  $\alpha=0.78$ ）。

#### 2.4.2 多维度评价体系

集成 FMEA 失效模式分析（识别氢致裂纹扩展主导失效路径）与蒙特卡罗模拟（计算系统可靠度

$R \geq 0.999$ ），建立氢掺混工况下的安全裕度评估标准（如爆炸极限安全系数 $> 1.5$ ）。

### 2.4.3 动态适应性准则

开发基于数字孪生的实时风险评估算法（采样频率 $> 10\text{Hz}$ ），耦合管道服役年限、区域人口密度（分三级阈值）等参数，输出动态风险等级（L1-L5）。

## 2.5 水力工况、配套工艺及相关标准和规范

与常规天然气相比，天然气混氢后管网输运水力工况会发生变化。研究表明，混氢后管道输气能量会降低，若要保持输气能量不变，需对混氢量进行控制。不同学者的研究结果存在差异，如有学者认为最大混氢量为6%（按质量分数计）时可保持输气能量不明显变化；黄明等提出当混氢比例为23%时，可通过提高管道起点压力保证输气能力不变。此外，混氢还会影管道配套的压缩机性能，需提高离心压缩机的转速以增加系统运行压力。

在配套工艺方面，需要发展精准混氢技术及设备、混氢天然气的氢分离技术及设备等。目前常用的混氢技术是采用流量随动式混气装置将氢气与天然气混合，但混氢天然气的氢分离成本较高，一般不以纯氢为使用目的。

在标准体系构建层面，当前全球尚未形成针对掺氢天然气（ $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气体）长输管道的专项技术规范。尽管欧美已出台 ASME B31.12（纯氢管道设计）、ISO 22734（氢能基础设施）等标准，但其适用场景与掺氢工况存在显著差异（如氢脆敏感性提升3-5倍）。

我国掺氢管道技术发展滞后国际先进水平约8-10年，现行项目仍沿用 API 5L/GB 9711 等传统天然气标准，导致以下适配性问题：

**设计冗余不足：**未考虑氢致体积膨胀（掺氢20%时管容需求增加23%）对压缩机选型的冲击；

**安全裕度缺失：**现有泄漏检测阈值（甲烷1%LEL）无法有效识别氢气扩散（检出限需 $\leq 0.5\% \text{ vol}$ ）；

**运维标准冲突：**常规管道阴极保护电位（-0.85V~-1.2V）在掺氢环境下可能加速氢渗透（速率提升40%）。

## 3 难题与建议

### 3.1 面临的难题

尽管混氢天然气管网输运技术取得了一定进展，但仍面临诸多难题。在技术层面，缺乏明确的混氢比例确定准则，不同研究结果差异较大，难以指导实际工程应用；管材与混氢天然气的适配性研究不够深入，尤其缺乏考虑多种气体组分协同影响的研究，且国内相关力学性能基础数据库不完善；安全事故研究不充分，针对不同混氢比例的系统性实验研究较少，缺乏

普适性结论；管网完整性管理缺乏统一标准和规范，现有评价方法难以准确评估混氢天然气管道的安全性能；水力工况和配套工艺的研究还需进一步深化，以提高输运效率和降低成本。

在标准规范方面，国内外均缺乏专门针对混氢天然气管道输运的标准规范，现有标准无法满足混氢天然气管道建设、运行和管理的需求，制约了该技术的大规模推广应用。

在产业发展方面，我国混氢天然气产业处于初步发展阶段，缺乏国家层面的战略性统筹规划，相关法律法规和产业政策不完善，导致产业发展缺乏明确的方向和支持。同时，公众对混氢天然气的认知度和接受度较低，也在一定程度上阻碍了产业的发展。

## 3.2 发展建议

为推进掺氢天然气（ $\text{H}_2\text{-CH}_4$ 混合气）管网输配技术发展，需重点实施以下战略举措：

### 3.2.1 全链条材料与系统适配性研究

#### 3.2.1.1 材料性能图谱构建

通过慢应变速率拉伸（SSRT）和断裂韧性试验（ASTM E1820），量化X60-X100钢级在掺氢工况下的氢脆敏感指数（HEI $> 15$ 时失效风险剧增），建立涵盖屈服强度降幅（如掺氢20%时X80钢下降28%）、裂纹扩展速率（ $\text{da/dN} \geq 1 \times 10^{-8} \text{ m/cycle}$ ）等参数的数据库。

#### 3.2.1.2 设备影响评估

采用计算流体力学（CFD）模拟压缩机阀腔掺氢流场（氢浓度梯度5%-30%），分析气阀颤振频率偏移（ $> 15\text{Hz}$ 时需重新设计）。

#### 3.2.1.3 系统优化准则

基于蒙特卡罗模拟（样本量 $> 10^6$ 次）确定现役管道掺氢上限（如一类地区 $\leq 10\%$ 、二类 $\leq 20\%$ ），制定《掺氢天然气管道适配性技术导则》。

### 3.2.2 安全风险防控技术升级

**事故演化机制解析：**开展全尺寸燃爆实验（依据EN 14994），测定掺氢浓度与爆炸超压的量化关系（如掺氢25%时 $\Delta P_{\text{max}}=2.4\text{MPa}$ ，较纯甲烷高3.2倍）；

**智能监测体系开发：**部署分布式光纤传感（DAS）网络（空间分辨率 $\leq 1\text{m}$ ），实现泄漏定位误差 $< 0.5\text{m}$ ，响应时间 $< 30\text{s}$ ；

**风险动态评估模型：**构建基于贝叶斯网络的概率风险评估框架（先验概率更新周期 $< 24\text{h}$ ），集成管道腐蚀速率（ $> 0.1\text{mm/a}$ 为高风险）、人口暴露密度（ $> 100 \text{人}/\text{km}^2$ 触发L3预警）等多维度参数。

### 3.2.3 标准体系与产业生态建设

**标准研制：**参照ASME B31.12-2024修订《高压

掺氢管道设计规范》，明确氢分离工艺的纯度标准（ $\geq 99.97\%$ ）、压缩机组氢兼容性认证流程；

政策赋能：将掺氢管网纳入国家战略性新兴产业目录，对示范项目给予税收减免（如设备投资抵免30%）、专项补贴（ $\geq 200$ 万元/km）；

公众认知提升：通过VR沉浸式教育系统（如模拟掺氢泄漏应急场景）提高公众风险意识，目标2025年重点区域科普覆盖率达80%。

#### 4 结论

混氢天然气管网输运技术是解决可再生能源弃电制氢大规模、长距离、安全高效输运的重要手段，具有广阔的应用前景。然而，目前该技术仍面临诸多难题，如混氢比例的确定、管材适配性、安全事故、管网完整性管理以及标准规范等方面的问题。

通过加强相关研究，完善技术标准和规范，以及出台政策支持，有望推动混氢天然气管网输运技术的大规模应用，促进氢能产业的发展，助力我国实现“碳中和”目标。未来，还需进一步深入研究和实践，不断优化和完善该技术，以应对能源转型和可持续发展的需求。

#### 参考文献：

- [1] 雷超, 李韬. 碳中和背景下氢能利用关键技术及发展现状[J]. 发电技术, 2021, 42(2): 207-217.
- [2] 李星国. 氢气制备和储运的状况与发展[J]. 科学通报, 2022(1): 1-12.
- [3] 王玮, 王秋岩, 邓海全等. 天然气管道输送混氢天然气的可行性[J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 130-136.
- [4] 刘翠伟, 裴业斌, 韩辉等. 氢能产业链及储运技术研究现状与发展趋势[J]. 油气储运, 2022, 41(5): 498-514.
- [5] 邱玥, 周苏洋, 顾伟, 等. “碳达峰、碳中和”目标下混氢天然气技术应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1301-1321.
- [6] 孙菲. “双碳”目标下掺氢燃气发电的现状与思考[J]. 当代石油石化, 2023, 31(2): 40-44.
- [7] 黄明, 吴勇, 文习之, 等. 利用天然气管道掺混输送氢气的可行性分析[J]. 煤气与热力, 2013, 33(4): 4.
- [8] 赵建福, 董绍华. 长距离管道纯氢与天然气掺氢输送技术专题序[J]. 力学与实践, 2023, 45(2): 227-229.
- [9] 崔兆雪, 田磊, 段鹏飞, 等. 掺氢天然气管道输送工艺特性[J]. 石油化工高等学校学报, 2021, 34(6): 8.

