

氢能管道输送技术研究

徐刚

泰山燃气集团有限公司道朗输配经营分公司 山东泰安

【摘要】本文围绕氢能管道输送技术展开研究，聚焦其在全球能源低碳转型中的关键作用。先阐述该技术类型、原理及适用场景，接着分析技术发展方向，随后指出技术、经济、标准规范三方面挑战，并针对性提出全链条技术突破、降本增效、构建统一标准体系的应对策略。文中还以国电投朝阳掺氢项目为例，验证技术可行性和价值，希望本文对相关从业人员有所帮助。

【关键词】管道；氢气；液态氢基能源；关键技术

【收稿日期】2025年4月18日 **【出刊日期】**2025年5月14日 **【DOI】**10.12208/j.ace.2025000184

Research on hydrogen pipeline transportation technology

Gang Xu

Taishan Gas Group Co., LTD. Daolang Transmission and Distribution Business Branch, Tai 'an, Shandong

【Abstract】This paper conducts research on hydrogen pipeline transportation technology, focusing on its crucial role in the global energy low-carbon transition. First, elaborate on the type, principle and applicable scenarios of this technology. Then, analyze the development direction of the technology. Subsequently, point out the challenges in three aspects: technology, economy and standard norms, and propose targeted countermeasures such as full-chain technological breakthroughs, cost reduction and efficiency improvement, and the construction of a unified standard system. The article also takes the State Power Investment Corporation's Chaoyang hydrogen Blending Project as an example to verify the technical feasibility and value, hoping that this article will be helpful to relevant practitioners.

【Keywords】Pipeline; Hydrogen; Liquid hydrogen-based energy; Key technologies

引言

全球能源加速低碳转型，氢能因零碳、高能量密度等特性成关键。其产业链中，长距离输送是规模化应用瓶颈，管道输送因低能耗、大运量等优势被认作长距离最优方式。我国氢能管道建设面临管材、安全标准等问题，系统研究相关技术对推动氢能产业规模化落地意义重大。

1 氢能管道输送技术类型及原理

氢能管道输送技术根据输送介质形态，可分为气态氢管道输送与液态氢基能源管道输送两大类，其中气态氢管道又细分为纯氢管道与天然气掺氢管道，不同技术路径在原理、设备要求与适用场景上存在显著差异（下图1为管道输氢及液态氢基能源技术分类图）。

1.1 气态氢管道输送

气态氢管道是当前应用最广的输氢技术，分纯氢

与天然气掺氢两种模式。纯氢管道将上游氢气加压至3-10MPa（部分14MPa），经专用管道送终端，可直接用于工业加氢等场景，氢气纯度无损耗，适合大规模长距离输送，如美国983公里管道年输氢数十万吨^[1]。天然气掺氢依托现有管网，按5%-25%比例混氢，改造成本仅为新建纯氢管道的1/3-1/2，我国宁夏、法国项目分别实现24%、20%掺氢比安全输送。

1.2 液态氢基能源管道输送

液态氢基能源管道以液氨、甲醇为氢载体，先管道输至终端再重整制氢，适用于超远距离、高能量密度场景。管道输氢及液态氢基能源的技术原理如图2所示。上游制氢后，经工艺合成载氢量19.6%的液氨或12.6%的甲醇，用改造输油管道输送，终端再还原氢气。其体积能量密度优势显著，7MPa、20℃下液氨约为高压气态氢的17倍，美国超3000公里液氨管道年输氢约39.2万吨，超同规模纯氢管道^[2]。

作者简介：徐刚（1975-）男，汉，山东省泰安市东平县，本科，安全主管，工程师，研究方向：公司安全设备管理。

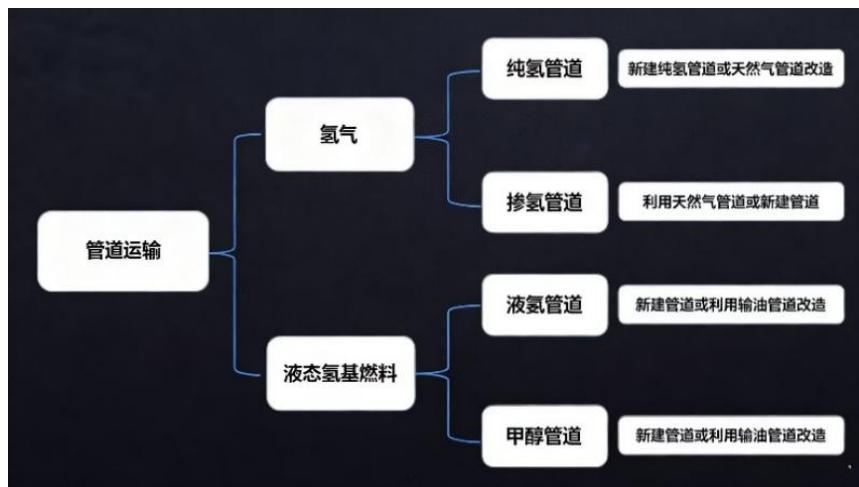


图 1 管道输氢及液态氢基能源技术分类图

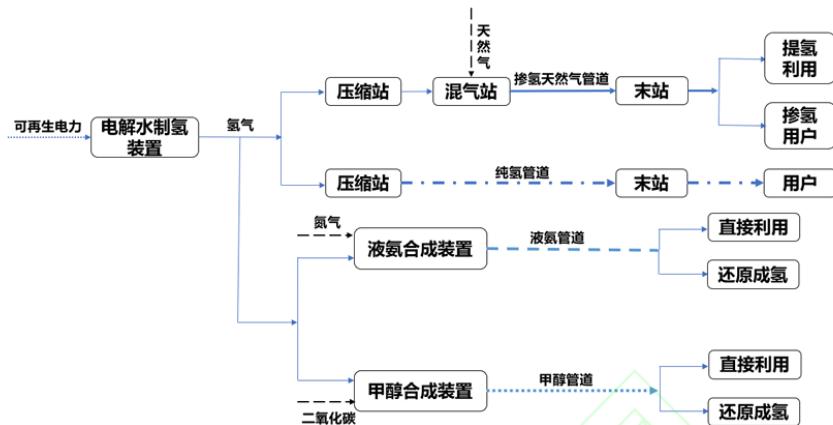


图 2 管道输氢及液态氢基能源技术原理图

2 氢能管道输送技术发展研究

2.1 管材与氢及掺氢天然气相融性研究

氢气的强渗透性和腐蚀性会引发氢脆，威胁管道安全运行。氢脆是氢原子侵入材料后，导致其力学性能下降、脆性增加并易断裂的现象，其发生与材料化学成分、组织结构、应力状态及氢气压力、温度密切相关，例如高强度钢在高压氢气环境中氢脆敏感性高，易发生氢致延迟断裂。为解决这一问题，国内外学者从多方面开展研究：材料研发上，通过优化合金成分和热处理工艺提升抗氢脆性能，像新型铬钼合金钢通过调整元素含量与分布、细化晶粒，兼顾强度、韧性与低氢脆敏感性，日本研发的此类材料已应用于部分氢气管道；表面处理技术方面，采用热喷涂陶瓷涂层、电镀镍层等方式形成保护膜，前者抗氢渗透且耐磨，后者可减少氢原子吸附扩散；同时，通过建立氢脆预测模型，结合数值

模拟与实验探究机理，为材料选择设计提供理论支撑，如基于微观力学和断裂力学的模型能预测材料氢脆敏感性与断裂寿命，保障管道安全^[3]。

2.2 氢气压缩技术提升

氢气压缩环节决定了管道输氢的经济性与能源利用率，其效率与功耗近年已显著改善。往复式压缩机通过结构优化、新型活塞环和密封填料减少泄漏，再以高性能润滑油降低摩擦，寿命延长且效率提升；螺杆机则调整非对称转子型线抑制回流，提高转速增大气量，并配高效冷却及时散热，整体性能随之上升^[4]。与此同时，隔膜压缩机用隔膜隔离气腔与驱动侧，氢气不接触润滑油，纯度与安全性更高，液压油推动隔膜往复即可完成压缩，适合加氢站等高纯需求场景；电化学压缩机依托电化学原理，无机械运动件，功耗低、噪声小，氢气在低压侧经质子交换膜或固体氧化物电解质电离，传

输至高压侧重新结合，实现静寂升压。

2.3 智能监控技术应用

智能监控已成为氢气管输的生命线，可连续跟踪运行工况并在隐患初现即予处置。整套方案沿程布设压力、流量、温度与泄漏四类传感器，数据经有线或无线链路汇聚至监控中心。压力侧选用高精度传感元件，读数越限即刻触发报警，系统同步下调压缩机转速或开启泄放阀，使压力回归安全区；流量侧实时计量氢气瞬时流量，并按下游需求微调，保证供给平稳；温度侧则防范过高导致材料强度下降、氢脆概率上升，或过低引起氢气液化，算法自动启停冷却或加热回路。泄漏检测是核心环节，综合声学、光学与电化学手段：声学模块捕捉泄漏喷流噪声并反向定位，光学模块利用激光诱导荧光或红外吸收测浓度，电化学模块通过反应电流判定泄漏量与坐标，实现秒级响应。平台同时嵌入闭环控制与分级预警逻辑，可依据实时数据自适应调节工况；异常时先推送机器决策，再通知人工复核^[5]。引入人工智能与大数据引擎后，系统可对历史曲线进行在线学习，提前数小时输出风险概率，为管道安全运行提供更可靠保障。

3 氢能管道输送技术面临的挑战

技术上，氢脆问题突出，氢气会使管道材料力学性能下降，虽可通过优化材料、表面处理应对，但泄漏检测与修复难度大，氢气分子小、渗透性强，现有检测技术受干扰或成本高，修复时因氢气易燃易爆且高压管道修复后性能难保证，同时掺氢天然气技术复杂，会增加氢脆风险、改变燃烧特性且普适性差；经济成本高昂，建设成本因材料要求高、工艺先进等是天然气管道的2-3倍，运营维护成本也因检测、设备维修及应急准备等比天然气管道高1.5倍以上；标准规范缺失，我国相关标准体系不完善，设计、制造、运行维护等环节缺乏统一明确规定，不仅带来安全风险，还制约了该技术的推广应用^[6]。

4 应对策略

4.1 从材料、检测到混输的全链条突破技术难题

为抑制氢脆，首要任务是切断氢与管壁的相互作用。材料端可开发含钼、铬等抗氢合金，借晶格调控提高韧性；制造端则利用热喷涂陶瓷或化学镀镍，在内壁沉积隔离层，降低氢渗透。泄漏监测可部署激光光谱、光纤传感等精密手段，辅以无人机巡线与地面传感网，实现快速定位；修复阶段采用带压密封与高分子复合贴片，避开动火焊接，既降低高压作业风险，又保证修复后的强度与密封。面对掺氢天然气的复杂工况，需先

建立5%、10%、20%等比例下的材料适应性数据库，划定氢脆临界值；随后研制专用混气装置确保均匀掺混，并对燃气灶、壁挂炉等终端实施适配改造，最终形成分区分阶段的掺氢推广路线，提高技术通用性。

4.2 通过技术创新与模式优化降本增效

压缩建设成本可从三条路径切入：首先，推动抗氢脆管材国产化，以规模化生产压低特殊合金价格，并同步研发碳钢内壁改性技术，在保障安全的同时削减材料支出；其次，升级施工工艺，普及自动焊机与数字化质检系统，降低人工误差和返工率，让施工节奏更快；最后，优先改造既有天然气管道用于掺氢，避免新建专线带来的高额初始投资^[7]。运维环节则借智能化手段瘦身：部署AI设备健康管理系统，对压缩机、阀门等关键部件实施预测性维护，减少非计划停机与备件更换；同时整合检测资源，搭建区域共享平台，避免重复购置高端设备，用专业化分工把单次检测成本压下来。

4.3 构建覆盖全生命周期的统一标准体系

设计环节应加速发布《氢能输送管道设计规范》，对不同输送压力——长输管道10-20MPa、城市管网1-4MPa——分别给出管径、材料及压力损失计算的关键指标，并统一计算方法与安全系数，使各方案在安全性与一致性上达到同一基准。制造端则需出台氢气专用管材的生产工艺、力学性能测试及焊接接头无损检测标准，明确氢脆敏感性试验方法与合格限值，从生产源头控制质量。运行维护方面，应完善《氢能管道运行维护技术规程》，细化压力、温度、流量的监测频次与报警阈值，规定年度氢脆检测、季度泄漏检测等定期检验周期，并给出故障应急流程；同时建立覆盖全生命周期的档案管理规范，为管道长期安全服役提供数据支撑。

5 案例分析—国电投在潮阳市的掺氢项目

5.1 项目定位与核心参数：国内电解制氢掺天然气的示范标杆

该项目是国内首个电解制氢掺入天然气项目，具备重要技术示范意义。在掺氢比例上，结合实际运行需求与技术要求动态调整，当前可实现5%-10%的掺氢范围。在设备与运输环节，项目依托燕山湖发电公司现有10Nm³/h碱液电解制氢站，新建氢气充装系统，氢气经压缩瓶储存后，通过集装箱式货车运输至掺氢地点；同时在朝阳朝花药业公司厂区外建设天然气掺氢设施，完成天然气掺氢示范的硬件搭建^[8]。

5.2 运行状况与技术验证：多维度技术成熟度的实践检验

项目自建成投运以来，整体运行状况良好，成功验证了多项关键技术的成熟性、可靠性与稳定性。其中包括电力制氢技术、氢气流量随动定比掺混技术、天然气管道材料与氢气相容性技术，以及掺氢天然气多元化应用技术。项目团队通过实时监测管道压力、温度、流量等参数，结合数据分析，深入研究掺氢天然气的燃烧特性、管道输送性能及对终端设备的影响，为后续技术推广积累了详实的数据支撑。

5.3 项目成果价值：打破垄断与填补国内技术标准空白

在技术与标准层面，该项目取得显著突破：一是成功打破国外在掺氢天然气领域的技术垄断，自主验证了核心技术的可行性；二是填补了国内天然气管道掺氢规范与标准的空白，通过对天然气管道材料与氢气相容性的系统研究，明确现有天然气管道在 5%-10%掺氢比例下的适用性与安全性，为利用既有天然气管道开展掺氢输送提供了关键技术依据。在应用探索上，项目还针对掺氢天然气在工业锅炉、民用燃气设备等场景的应用进行测试，验证了其在不同场景下的可行性与节能优势。

6 结束语

综合来看，氢能管道输送技术凭借低能耗、大运量优势，已成为氢能规模化应用的关键支撑，其技术类型、发展方向、现存挑战及应对策略已形成完整研究框架，国电投潮阳掺氢项目等实践更提供了宝贵经验。虽当前在技术突破、成本控制、标准完善上仍需发力，但随

着全链条技术创新、降本模式优化及统一标准体系构建，氢能管道输送技术将持续成熟。

参考文献

- [1] 马玲. 氢能储运:制氢与用氢的桥梁[N]. 中国石化报, 2025-06-09 (007).
- [2] 沙曼. 氢能利用下的掺氢管道物性分析和输送特性研究 [J]. 石油石化节能与计量, 2025, 15 (02): 21-25.
- [3] 崔振莹. 氢能储运技术现状及发展分析 [J]. 中外能源, 2024, 29 (07): 31-39.
- [4] 李玲. 我国输氢管道建设提速[N]. 中国能源报, 2024-06-03 (014).
- [5] 李周波,芦琳,田小江,等. 氢能长距离输送的经济性研究 [J]. 焊管, 2023, 46 (12): 58-63.
- [6] 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.
- [7] 彭福银,彭疆南. 氢能发展路线分析 [J]. 低碳世界, 2019, 9 (04): 121-122.
- [8] 魏星. 混氢天然气管道输送技术及难点研究 [J]. 上海煤气, 2022, (05): 4-7+18.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS