

天然气长输管道与氢能长输管道的集中敷设技术与架构

王微坡 (陕西鸣德通圣工程设计有限公司, 陕西 西安 710065)

周 昂 (陕西金信大业能源科技有限公司, 陕西 西安 710075)

摘 要: 为避免天然气管道与氢能管道各自规划造成的资源浪费及监管困难, 内蒙古首创“一干双环四出口”管网架构, 统筹规划 14 条管线 (10 条绿氢与 3 条绿醇以及 1 条绿氨), 总长 4400km。以包头 - 临河天然气掺氢管道工程为依托, 探索两类管道集中敷设技术。该工程管径 457mm, 设计压力 6.3MPa, 年输气能力 3.93 亿 m^3 , 是国内首条具备掺氢输送能力的高压管道。项目建立远程监控系统, 为两类管道统一规划提供技术支撑。

关键词: 天然气管道; 氢能管道; 集中敷设; 统一规划; 管网架构

中图分类号: TE832 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2025) 022-0076-03

Centralized Laying Technology and Architecture for Long-Distance Natural Gas and Hydrogen Pipelines

Wang Weipo (Shaanxi Mingde Tongsheng Engineering Design Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710065, China)

Zhou Ang (Shaanxi Jinxin Daye Energy Technology Co., Ltd., Xi'an Shaanxi 710075, China)

Abstract: To avoid resource waste and regulatory challenges caused by separate planning of natural gas and hydrogen pipelines, Inner Mongolia pioneered a “one trunk, dual loops, four exits” pipeline network architecture, integrating 14 pipelines (10 green hydrogen, 3 green methanol, and 1 green ammonia) with a total length of 4,400 kilometers. Relying on the Baotou-Linhe hydrogen-blended natural gas pipeline project, the study explores centralized laying technologies for the two types of pipelines. With a diameter of 457 mm, a design pressure of 6.3 MPa, and an annual gas transmission capacity of 393 million cubic meters, this project is China's first high-pressure pipeline capable of hydrogen-blended transportation. A remote monitoring system has been established to provide technical support for unified planning of both pipeline types.

Keywords: natural gas pipeline; hydrogen pipeline; centralized laying; unified planning; pipeline network architecture

当前内蒙古已建成绿氢产能 3 万 t/a, 在建 19 万 t/a, 开展前期工作 92 万 t/a, 但输氢管网建设滞后制约产业发展。包头 - 临河管道工程全长 249km, 其中巴彦淖尔境内 236km, 管道掺氢比例可达 10%。内蒙古规划建设乌兰察布至燕山石化输氢管道 (全长 1145km) 与康保至曹妃甸输氢管道 (全长 1037km) 等重点项目。通过统一规划两类管道, 优化管网布局, 共享走廊资源, 可有效降低建设成本, 提高土地利用效率, 实现管网集约发展。随着氢能产业快速发展, 建设完善的输氢管网体系成为必然趋势。合理利用现有天然气管网资源, 统筹规划两类管道建设, 不仅可节约投资及土地资源, 还能降低工程建设难度, 为氢能规模化利用创造有利条件。

1 天然气与氢能长输管道集中敷设总体架构

天然气跟氢能长输管道集中敷设总体架构依据内蒙古能源转型发展需求, 按照“一干双环四出口”总体规划构建新型管网体系 (如图 1 所示)。该规划全面统筹布局 14 条管线, 其中包含 10 条绿氢管道与 3 条绿醇管道以及 1 条绿氨管道, 总长度达到 4400km。中部干线起到串联重点氢能工业基地的作用, 东部环



图 1 “一干双环四出口”内蒙古输氢管网规划示意图

线连接赤峰至锦州港绿氢走廊, 西部环线贯通鄂尔多斯至包头工业集群, 从而形成多源联通与区域互补的管格局。在管道选线进程中充分考虑地形地貌特征与水资源条件以及环境敏感因素, 优先利用现有的管廊走廊并合理确定安全防护距离。管道设计采用分段建设与分期实施的策略, 近期主要以天然气掺氢为主, 远期逐步朝着纯氢输送方向发展, 以此确保规划能够落地可行, 工程现场运用高空作业平台开展管道焊接施工, 鉴于氢能易渗透易泄露的特性对输氢管道密封度要求极高^[1]。通过严格把控焊接工艺, 采用氩弧焊打底与填充以及盖面工艺, 经检测焊缝合格率达到

100%，为集中敷设管网建设积累了宝贵经验。

2 集中敷设关键技术应用

2.1 并行敷设工艺

内蒙古“一干双环四出口”管网规划里天然气管道及氢能管道采用并行敷设方式且管道间距依据不同压力等级及管径大小合理确定。针对兴安盟—通辽—赤峰绿醇管道（1025km）采用管径 DN400 以上设计压力 4MPa 的高压输送系统，为保证管道安全运行换气速度按照如下公式计算：

$$v_1 = nV / (3600F) \quad (1)$$

式中： v_1 为换气速度单位是 m/s， n 为换气频率单位是 h^{-1} ， V 为舱内体积单位是 m^3 ， F 为通风口面积单位是 m^2 。

施工过程中采用机械化开挖与人工精细开挖相结合方式严格控制沟槽尺寸精度。管沟开挖深度按照冻土层要求确定且底部设置缓冲砂垫层两侧回填细土分层夯实确保管道基础稳定性。管沟上方设置警示带及光缆实现管线安全保护与信息传输功能，在特殊地质条件区段采用定向钻进及顶管等非开挖施工技术减少地表植被破坏保护生态环境^[2]。

2.2 材料防护处理

天然气掺氢管道的关键技术难点主要在于氢气对管材产生的影响。包头—临河掺氢管道工程选用 X80 高钢级管线钢，其管径为 457mm 且设计压力达到 6.3MPa。经试验验证在 4MPa 总压下，于氢分压处于 0–2MPa 的环境当中，管材的强度基本不会受到影响，不过断裂延伸率及断面收缩率会随氢分压增大而下降。在材料防护工艺里需重点考虑温度循环与压力波动等运行工况对管材性能造成的影响。要对材料开展长期氢气环境适应性评价试验，研究不同温度与压力条件下的氢脆敏感性并建立材料性能预测模型，通过微观组织分析与力学性能测试以及失效机理研究来优化材料成分设计及热处理工艺，以此提高管材的抗氢脆性能。

针对以上这些特点采用内防腐涂层与外防腐层复合结构，内层选用环氧树脂涂料而外层采用三层 PE 结构。焊缝区域采用热收缩套防腐技术且穿越区段采用加强级防腐层，同时设置阴极保护系统来有效防止管道腐蚀，对管道关键部位进行应力分析并采用柔性连接及补偿装置，从而降低管道应力集中以提高使用寿命。防腐层施工过程中采用自动喷涂设备确保涂层厚度均匀且附着力强^[3]。在管道弯头与阀门等易发生应力集中的部位增加防腐层厚度，并且采用弹性填充材料进行保护。施工完成后进行防腐层质量检测，涵盖厚度测量与针孔检测以及剥离强度试验等内容，形成完整的检测记录为后期维护提供依据。

2.3 焊接施工方法

在氢气管道焊接施工过程当中，深能鄂托克前旗上海庙经济开发区光伏制氢项目运用氩弧焊三层焊接工艺。管道施工现场专门配备了高空作业平台，焊接人员采用由下向上的具体焊接方式。鉴于氢气具有容易渗透的独特特性，项目部对焊接工艺参数开展优化设计工作，着重控制焊接电流与电弧电压以及焊接速度这三个关键参数。

在实际施工中，采用氩弧焊打底与填充以及盖面的三层焊接工艺。每名焊工每天完成的环焊缝控制在 4 道以内，焊接过程中采用全方位防风措施，环境温度低于 -20°C 时停止焊接作业。深能鄂托克前旗上海庙经济开发区光伏制氢项目输氢管道工程中，输氢量为 $5000\text{Nm}^3/\text{h}$ ，管线长度约 2km，通过严格的焊接质量控制，焊缝合格率达到 100%。施工现场配备专业检测团队，对所有焊缝进行射线探伤及超声检测。

2.4 远程监控系统

在内蒙古天然气与氢能管道集中敷设工程当中采用智能化远程监控系统对管网运行状态进行全程管理^[4]。于管道关键节点设置压力变送器与温度传感器以及流量计等现场仪表来构建多层次的数据采集网络。系统依靠光纤通信实现工艺参数实时传输并对管道压力与温度以及流量等运行参数进行动态监测。管道场站设置智能化调压装置及远程控制阀门以形成自动化的管网调控体系。

通过管道智能化调控系统，实现了对包头—临河管道全线 249km 范围内的压力调节及流量控制。管道年设计输气能力 3.93 亿 m^3 ，设计压力 6.3MPa，增压后可实现 20 亿 m^3/a 的输送能力。系统采用分区域调控策略，在巴彦淖尔境内 236km 范围设置多个监控节点，实现天然气管道掺氢比例 10% 的精准调控。监控中心配备专业团队进行 24h 值守，通过光纤通信网络实现数据实时传输，保障管网安全稳定运行。

3 集中敷设技术效果评估

3.1 技术可行性分析

天然气管道及氢能管道集中敷设技术具备可行性是因为两类管道有着相似工艺基础。内蒙古包头—临河的掺氢管道工程借助技术创新，突破了氢气易渗透以及易泄漏等技术瓶颈进而实现长距离高压输送。为了系统评估该工程的各项技术指标而对管道关键性能参数开展测试分析从而形成完整的技术评估数据库。

据表 1 技术参数测试结果显示，在不同掺氢比例下管道性能保持稳定。管道设计压力维持在 6.3MPa，年输送能力达到 3.93 亿 m^3 。管材强度仅略微降低，最大降幅不超过 1%，焊缝质量保持稳定。尤其是在 10%

的掺氢条件之下，泄漏检测的精度反而得到了提高，这主要得益于氢气检测系统的灵敏度得到优化。通过严格的技术评估进行验证可知，该工程所采用的集中敷设技术方案切实可行，为后续的推广应用奠定了坚实基础。在技术评估的过程当中建立起了完善的数据记录系统，对管道运行过程中的各项参数开展持续跟踪分析工作，为管网的优化运行提供了重要依据^[5]。

表 1 包头 - 临河掺氢管道关键技术参数测试结果

测试项目	0% 掺氢	5% 掺氢	10% 掺氢
管道输送压力 (MPa)	6.3	6.3	6.3
年输送能力 (亿 m ³)	3.93	3.93	3.93
管材强度 (MPa)	565	562	560
焊缝合格率 (%)	100	100	100
泄漏检测精度 (ppm)	1.0	0.8	0.5

3.2 经济效益评估

集中敷设这种方式能够显著降低管道建设方面的成本。在内蒙古“一千双环四出口”规划当中，兴安盟 - 通辽 - 赤峰绿醇管道全长达到了 1025km，通过对选线方案进行优化实现与现有天然气管道共用廊道资源。在建设过程里土地征用与管沟开挖以及线路调查等多个环节进行共享作业从而形成规模效应，经济效益数据分析结果表明共建方案的投资优势十分明显。

表 2 管道建设投资对比分析

建设项目	分散建设 (万元 /km)	集中建设 (万元 /km)	节约率 (%)
土地征用	126	75	40.5
管沟开挖	85	52	38.8
线路调查	32	20	37.5
材料运输	58	38	34.5
施工安装	145	98	32.4

据表 2 经济效益分析表明，集中敷设模式在各项建设成本上均实现显著节约。土地征用费用降低 40.5%，体现了廊道资源共享的优势；管沟开挖成本降低 38.8%，反映出施工工序优化的效果；线路调查费用节约 37.5%，显示了前期工作协同开展的效率；材料运输成本及施工安装成本分别降低了 34.5% 及 32.4%，很好体现了资源统筹利用所具有的经济性特点。通过开展科学规划以及实施精细化管理，项目建设达成了工期及成本的双重优化目标，为管网集约化建设树立起了值得借鉴的典范。工程施工过程当中采用机械化作业及自动化焊接技术，切实有效提高了施工效率并减少了人工成本支出。

3.3 安全性能分析

天然气与氢能管道集中敷设工程的安全性能是体现在全生命周期的系统防护里。在设计阶段，管道选材会充分考虑氢气对材料所产生的影响，采用抗氢脆性能良好的 X80 高钢级管线钢，内层选用环氧树脂涂

料且外层采用三层 PE 防腐层结构。在施工过程中，焊接工艺严格执行氩弧焊打底与填充以及盖面的三层焊接标准，针对氢能易渗透易泄露的特性，对输氢管道密封度有着极高要求。焊缝区域采用热收缩套防腐技术，穿越区段设置加强级防腐层与阴极保护系统^[6]。

管道投运之后建立了分层分布式的监控体系，在关键节点设置压力变送器与温度传感器以及流量计等现场仪表，构建多层级的数据采集网络。系统通过光纤通信实现工艺参数实时传输，对管道压力与温度以及流量等运行参数进行动态监测。在日常维护当中，施工队伍定期进行管道外观检查与防腐层检测以及阴极保护测试，建立完整的检测记录并及时消除安全隐患。针对可能发生的泄漏事故，制定了分级响应预案，配备专业抢修队伍及应急装备，定期组织应急演练来全方位保障管道运行安全。通过安全防护体系的有效运行，内蒙古首条绿氢输送管道工程实现了稳定可靠运行，为集中敷设管道的安全性能提供了实践验证。

4 结语

内蒙古在天然气管道与氢能管道集中敷设方面的实践显示，通过统一规划以及共建共享的方式能够实现两类管道协同发展。包头 - 临河掺氢管道工程通过创新应用抗氢脆材料及优化施工工艺，成功解决集中敷设所面临的技术难题。不过鉴于氢气具有特殊性，依旧需要加强管材适应性研究并完善泄漏监测体系。内蒙古所规划的 4400km 氢能管网，会为全国天然气与氢能管道统一规划与集中敷设提供重要借鉴。未来探索两类管道集中敷设技术与优化管网规划布局并制定完善技术标准体系，对推进氢能产业高质量发展及构建清洁低碳能源体系有着重要意义。

参考文献：

- [1] 刘中庆, 王俊, 康楠, 等. 在役天然气管道站场掺氢后防火间距探讨 [J]. 油气田地面工程, 2025, 44(03): 58-64+72.
- [2] 张赫, 田洁, 曹友增. 内蒙古氢能产业发展的现状、问题及对策 [J]. 内蒙古社会科学, 2025, 46(02): 205-212.
- [3] 崔文豪, 赵滨, 马鹏程. 天然气管道掺氢技术的探讨 [J]. 山东化工, 2025, 54(05): 139-141+145.
- [4] 杨冰雪, 杨洪斌. 掺氢压力管道智能化检测模型的研究与应用前景 [J]. 中国特种设备安全, 2025, 41(02): 86-91.
- [5] 江业强, 马贵阳, 姜向春, 等. 综合管廊内掺氢天然气管道泄漏扩散数值模拟研究 [J]. 辽宁石油化工大学学报, 2025, 45(01): 59-64.
- [6] 杨旸, 单新煜, 韩文杰, 等. 掺氢对现役天然气管道输送的影响 [J]. 当代化工, 2025, 54(01): 197-201.