

引文: 赵赏鑫, 杨明, 张晓瑞. 欧洲纯氢管网规划及对中国纯氢管网规划建设启示[J]. 油气储运, 2025, 44(1): 1–9.

ZHAO Shangxin, YANG Ming, ZHANG Xiaorui. Planning of pure hydrogen pipeline network in Europe and its implications for China[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2025, 44(1): 1–9.

欧洲纯氢管网规划及对中国纯氢管网规划建设启示

赵赏鑫¹ 杨明¹ 张晓瑞²

1. 国家管网集团西部管道有限责任公司; 2. 北京市煤气热力工程设计院有限公司

摘要: 【目的】美国、欧洲是世界上最早建设纯氢管道也是目前纯氢管道建设较为集中的地区, 现有纯氢管道分别达 2 600 km、1 770 km, 近年来欧洲更是规划了超过 30 000 km 的纯氢管道网络, 积累了较多成功经验, 中国在构建新型能源体系过程中可借鉴其先进做法开展中国纯氢管网规划与建设。【方法】通过系统梳理欧洲纯氢管道路由、技术参数及建设计划, 总结其规划特点及先进经验, 同时对比分析中国纯氢管道建设与规划现状, 讨论形成中国纯氢管网发展建议。【结果】欧洲纯氢管网规划呈现 3 个特点: ①各管道公司通过组成组织机构或联合项目, 共同开发地区纯氢管网, 管网连通性、灵活性、协调性均较强; ②管道最高设计压力 10 MPa、最大管径 1 200 mm、最大设计输量 200×10^4 t/a, 加速向大口径、高压、大输量方向发展; ③纯氢管网规划大量依托原有天然气管网基础设施, 超过 50% 由现有管道改造而来, 部分新建管道也计划沿现有管道路由敷设, 从而降低管道建设投资, 提高管道资产、土地资源利用效率。【结论】借鉴欧洲纯氢管网规划建设先进经验, 对中国纯氢管道规划建设提出 3 个建议: ①在国家层面推进纯氢管网顶层规划, 全国一盘棋, 避免重复建设, 提高资产资源利用效率; ②布局开展油气管道改输氢气的相关技术研究, 形成必要的技术与标准体系; ③新建天然气管道在设计阶段需考虑后期改输氢气的可行性。(表 3, 参 44)

关键词: 欧洲; 纯氢管网; 规划建设; 天然气管道改输氢

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2025)01-0001-09

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2025.01.001

Planning of pure hydrogen pipeline network in Europe and its implications for China

ZHAO Shangxin¹, YANG Ming¹, ZHANG Xiaorui²

1. PipeChina West Pipeline Co., Ltd.; 2. Beijing Gas and Heating Engineering Design Institute

Abstract: 【Objective】The United States and Europe pioneered the construction of pure hydrogen pipelines, and currently possess pure hydrogen pipelines totaling 2,600 km and 1,770 km, respectively. Europe has recently planned an extensive pure hydrogen pipeline network exceeding 30,000 km, gaining valuable experience in the process. China can draw on these advanced practices to inform its planning and construction of pure hydrogen pipeline networks as part of its new energy system development. 【Methods】Through systematic analysis of the routes, technical parameters, and construction plans of pure hydrogen pipelines in Europe, key planning characteristics and advanced practices were identified. A comparative analysis of the current status of pure hydrogen pipeline construction and planning in China was also conducted, yielding recommendations for the development of pure hydrogen pipelines in China. 【Results】The planning of the pure hydrogen pipeline network in Europe exhibits three key characteristics: (1) Pipeline companies collaboratively develop a regional network through joint organizational structures or projects, fostering strong connectivity, flexibility and coordination. (2) The maximum design pressure of the pipeline reaches 10 MPa, the maximum pipe diameter 1,200 mm, and the maximum design transport capacity 200×10^4 t/a, driving advancements toward larger diameters, higher pressures and increased transport capacities. (3) The planning relies significantly on existing natural gas pipeline infrastructure, with over 50% of the network transformed from existing pipelines. Additionally, new pipelines are often planned alongside existing routes, reducing construction costs and improving the efficiency of asset and land resource utilization.

[Conclusion] Based on the advanced experience in pure hydrogen pipeline network planning in Europe, three recommendations are offered for the planning and construction of pure hydrogen pipelines in China: (1) Enhance top-level planning of the pure hydrogen pipeline network at the national level to ensure coordinated efforts across the country, minimizing redundant construction and optimizing asset and resource utilization. (2) Conduct research on supporting technologies for repurposing oil and gas pipelines for hydrogen transport, establishing necessary technical and standard systems. (3) Evaluate the feasibility of repurposing pipelines for hydrogen transport during the design phase of new natural gas pipelines. (3 Tables, 44 References)

Key words: Europe, pure hydrogen pipeline network, planning and construction, repurposing natural gas pipelines for hydrogen transport

氢能是一种灵活高效、清洁低碳、应用广泛的二次能源。根据世界氢能委员会发布的报告,全球氢能项目数量正在快速增长,截至 2023 年 12 月,已有超过 1 400 个项目,总投资达 $5\,700\times 10^8$ 美元,预计到 2030 年绿氢与低碳氢产能达 $4\,500\times 10^4$ t/a。其中,欧洲项目数量居全球首位,达到 540 个,预计到 2030 年绿氢与低碳氢产能可达 $1\,390\times 10^4$ t/a^[1]。管道输氢作为一种高效、经济的氢能运输方式,在全球范围内逐渐受到重视并呈现快速发展的趋势。欧洲、美国是世界上最早建设氢气管道网络的地区,其中德国早在 1939 年就敷设了全长 208 km、管径 254 mm、压力 2 MPa、流量 9 000 kg/h 的氢气管道^[2]。目前,全球纯氢管道总里程超过 5 000 km^[3],美国约有 2 600 km,欧洲约有 1 770 km。法国 Air liquid 公司建设的全长 402 km 的法国—比利时输氢管道为欧洲目前最长的纯氢管道。美国的纯氢管道主要分布在得克萨斯州、路易斯安那州及加利福尼亚州,墨西哥湾沿岸纯氢管网总里程约 965 km,设计输量 150×10^4 m³/h,最大运行压力 6 MPa,是目前全球最大的氢气供应管网^[4]。中国纯氢管道起步较晚,发展缓慢,尚未形成完善的氢气管道输送体系,现有氢气输送管道总里程约 400 km,据不完全统计,中国目前处于规划设计阶段的纯氢管道约 3 000 km。纯氢管道的快速发展,亟需摆脱传统管道规划理念、建设方法的束缚,探索适用于新型能源体系的管道规划建设新思路。因此,通过梳理对比中国与欧洲纯氢管网规划建设的异同,借鉴有益经验,以提高中国纯氢管网规划建设水平。

1 欧洲纯氢管网规划及其特点

1.1 欧洲纯氢管网规划

与中国类似,欧洲氢气的生产与消费存在空间错

位问题,其绿氢生产分布于北海、波罗的海、东欧以及北非等可再生能源丰富地区^[5],消费则集中在德国、法国、意大利等欧洲内陆地区^[6]。除本地生产外,欧洲还需要从其他地区进口绿氢,预计到 2030 年欧洲氢气需求将达到 $3\,000\times 10^4$ t/a,2050 年将超过 1×10^8 t/a,其中的 10%~15% 需要进口^[7]。为此,欧洲发布多项纯氢管道计划:意大利、德国、奥地利共同签署协议,计划在北非与欧洲之间建设南部氢能(SouthH₂)走廊,全长 3 300 km;西班牙、葡萄牙、法国宣布将共同建设连接 3 个国家的跨境纯氢管道,预计 2030 年投用;2020 年 11 家管道公司发起欧洲纯氢主干管网项目,计划于 2030 年建成超过 30 000 km 的纯氢管网,由北非与南欧地区、西南欧地区、北海地区、北欧与波罗的海地区、东欧与东南欧地区、德国地区 6 部分组成,到 2023 年底,已有 24 个欧盟成员国及挪威、英国、瑞士、乌克兰等共计 33 个国家参与^[8]。

1.1.1 北非与南欧地区

北非与南欧地区的纯氢管网由北非及意大利南部向中欧输送绿氢,以 SouthH₂ 走廊项目为主体,连接斯洛文尼亚纯氢主干管网、Murfeld 纯氢管道等,60% 纯氢管道计划由现有管道改造建设,逾 360 km 纯氢管道与现有管道并行敷设,充分体现了对现有管道基础设施的再利用理念。

SouthH₂ 走廊项目由意大利 Snam、德国 Bayernets、奥地利 TAG(Trans Austria Gasleitung)、英国 GCA(Gas Connect Austria)这 4 家公司共同发起,连接北非、意大利、奥地利与德国,将欧洲南部生产的低成本绿氢输送至欧洲腹地。SouthH₂ 走廊项目由意大利纯氢主干管网、TAG 管道系统纯氢项目、WAG(West Austria Gas Pipeline)+PW(Penta-West Pipeline)纯氢管道、巴伐利亚 HyPipe 纯氢管道组成,全长 3 300 km,超过 70% 纯氢管道由天然气管道改造而成,设计输量为

400×10⁴ t/a, 已超过欧盟重新供能(REPowerEU)方案进口目标的40%^[9]。意大利纯氢主干管网起点为西西里岛, 贯穿意大利境内, 并与奥地利、瑞士纯氢管网相连。意大利纯氢主干管网(表1)由南-北主干管网、东主干管网、西主干管网、2座压气站、输氢支线组成^[10], 其中干线总里程约2 300 km, 约75%由天然气管道改造而成, 设计输量400×10⁴ t/a, 压气站单座功率25 MW。

表1 意大利纯氢主干管网系统参数表
Table 1 Parameters of pure hydrogen backbone systems in Italy

组成部分	管径/mm	里程/km
南-北主干管网	1 050~1 200	1 520
东主干管网	850~1 050	337
西主干管网	750~1 200	410
支线	400~600	530

TAG系统纯氢项目位于奥地利境内, 起点为意大利与奥地利边境阿诺尔德施泰因, 终点为奥地利与斯洛伐克边境鲍姆加藤, 全长380 km, 设计输量150×10⁴ t/a, 具备正反输能力。该项目计划将TAG系统的3条现有天然气管道之一改造为纯氢管道, 包括压缩机、计量站、分输站等相关设施^[11]。WAG+PW纯氢管道横跨斯洛伐克、奥地利、德国3个国家, 规划路由与现有WAG管道、PW管道并行^[12], 新建纯氢管道逾200 km, 同时改造140 km现有管道, 设计输量为130×10⁴ t/a, 具备正反输能力。巴伐利亚HyPipe纯氢管道与德国、奥地利地区纯氢管网相连, 全长300 km, 其中95%由天然气管道改造建成^[13], 设计输量达到了150×10⁴ t/a, 计划2025年完成第1段14 km纯氢管道建设, 2030年全线建成投产。

1.1.2 西南欧地区

2022年, 法国、西班牙、葡萄牙、德国4个国家的5家管道公司共同发起H₂Med项目, 建设西南欧地区的纯氢管网, 全长6 139 km, 主要由陆上新建管道组成, 此外包含逾400 km海底大口径纯氢管道, 全线设计输量200×10⁴ t/a, 总投资约25×10⁸欧元, 计划2030年建成投产, 可满足欧洲地区10%的氢能需求^[14]。H₂Med纯氢管网主要包括葡萄牙纯氢主干管网、葡萄牙—西班牙CelZa纯氢管道、西班牙纯氢主干管网、西班牙—法国BarMar纯氢管道、法国HY-FEN纯氢管道、法国HySow纯氢管网等, 最终连接到德国

H₂Ercules纯氢管网, 用于将西班牙、葡萄牙生产的绿氢输送至法国、德国等消费地区。

葡萄牙纯氢主干管网全长391 km, 由一条新建50 km纯氢管道与3条改造管道组成, 3条改造管道的里程分别为76 km、48 km、217 km。CelZa纯氢管道与葡萄牙纯氢主干管网相连, 横跨葡萄牙与西班牙, 全长248 km, 葡萄牙境内162 km、西班牙境内86 km, 全部为新建管道, 设计输量75×10⁴ t/a, 具备正反输能力, 管径700 mm, 设计压力10 MPa, 增压站总功率24.6 MW。西班牙纯氢主干管网由7条管道、2座地下储氢库组成, 管网全长3 205 km, 总储气量575 GW·h, 与CelZa管道、BarMar管道连通。BarMar纯氢管道是一条海底管道, 连接西班牙纯氢主干管网与法国马赛附近的福斯—苏尔—梅尔工业中心, 全长455 km, 设计输量200×10⁴ t/a, 管径700~1 050 mm, 压缩功率140 MW, 最深处约2 600 m。法国HY-FEN纯氢管道在马赛地区与BarMar纯氢管道相连, 延伸至法国与德国边境, 与H₂Ercules纯氢管道相连, 全长1 200 km, 设计输量200×10⁴ t/a。HySow纯氢管网位于法国西南部, 主要为东西走向, 分别与BarMar管道、HY-FEN管道相连, 全长640 km, 其中180 km由天然气管道改造而成, 设计输量为40×10⁴ t/a, 包括2座地下储气库, 总储气量500 GW·h^[15]。

1.1.3 北海地区

北海地区纯氢管网用于将海上风电生产的绿氢运输至德国西部地区的消费中心^[16], 主要包括荷兰纯氢管网、HyONE纯氢管网、H₂T纯氢管道、AquaDuctus纯氢管道、比利时纯氢主干管网、丹麦—德国纯氢管网。与其他地区相比, 北海地区纯氢管网海底管道多, 技术规格高, 预计2030年建成超过1 000 km海底纯氢管道, 设计输量超过100×10⁴ t/a, 最大管径1 200 mm。

荷兰纯氢管网接收海上进口氢, 除满足本国氢气需求外, 还向欧洲地区输送。其设计输量80~120 TW·h/a, 70%~80%的管道由天然气管道改造而来^[17], 目前已完成最终投资决策, 计划2025—2026年间开始建设, 2030年建成投产。HyONE纯氢管网用于收集海上风电电解水生产的氢气, 并输送至荷兰、德国。目前已建成500 MW电解制氢系统, 预计2040年建成12 GW电解制氢系统^[18]。管网设计输量为240 TW·h/a, 其中荷兰与德国之间的互联管道设计输量为48 TW·h/a。H₂T纯氢管道由两段海底管道组成, 分别为Aukra纯

氢管道、CHE(Clean Hydrogen to Europe)纯氢管道。Aukra 纯氢管道将丹麦 Nyhamna 地区可再生能源制得的氢气输送至丹麦 Kollsnes 地区,并与 CHE 纯氢管道相连,全长 410 km,管径 500 mm^[19]。CHE 纯氢管道则从丹麦延伸至德国北部,设计方案正在评估中。AquaDuctus 纯氢管道用于将海上风电电解水生产的氢气输送至德国,分两期建设:一期建设 200 km 管道,将海上制氢风电场生产的氢气输送至德国威廉港,风电场装机容量 1 GW,管径 1 200 mm,到达陆上后,通过陆上管道与 Hyperlink 管网相连,预计 2030 年建成投产;二期新建管道 220 km,设计输量为 100×10^4 t/a,继续向深海延伸,预计 2035 年建成投产^[19]。

1.1.4 北欧与波罗的海地区

北欧与波罗的海地区纯氢管网用于将海上风电电解生产的绿氢输送至消费地区,主要包括北欧一波的尼亚湾纯氢管道、北欧一波罗的海氢能走廊、波罗的海氢能集输管网、德国—丹麦海上纯氢管道。与北海地区类似,北欧与波罗的海地区纯氢管网包含大量海底及沿海岸线敷设的管道,其规划海底管道总里程近 1 400 km。

北欧一波的尼亚湾纯氢管道横跨瑞典、芬兰两国,全长 1 000 km,设计输量 65 TW·h/a,干线沿瑞典、芬兰两国的海岸线敷设,并向瑞典北部建设 1 条支线,预计总投资 35×10^8 欧元^[20-21],目前处于预可研阶段,计划 2030 年建成投产。北欧一波罗的海氢能走廊起点位于芬兰,与北欧一波的尼亚湾纯氢管道终点相连,自北向南途经芬兰、爱沙尼亚、拉脱维亚、立陶宛、波兰,最终到达德国境内,其全长 2 500 km,设计输量

270×10^4 t/a^[22]。该项目于 2022 年签订合作协议,目前已完成预可研,计划 2040 年建成投产。波罗的海氢能集输管网地处波罗的海,用于收集海上风电制得的氢气,并与瑞典、芬兰、德国的陆上纯氢管道相连,全长 1 250 km,设计输量 296 TW·h/a,目前处于预可研阶段。德国—丹麦海上纯氢管道起点位于丹麦博恩霍尔姆岛,终点位于德国卢贝明^[23],全长 140 km、设计输量 80 TW·h/a、管径 1 050 mm,目前处于预可研阶段,计划 2027 年建成投产。

1.1.5 东欧与东南欧地区

东欧与东南欧地区氢能管网从希腊、乌克兰途经保加利亚、罗马尼亚、匈牙利、斯洛伐克、奥地利向消费地区输送氢气,主要包括中欧氢能走廊、匈牙利与 4 国氢能管道、希腊纯氢管网,通过改造现有天然气管道或沿现有管道敷设。

中欧氢能走廊起点位于乌克兰,横跨斯洛伐克、捷克,最终到达德国,全长 1 225 km,超过 90% 由天然气管道改造而成,设计输量为 150×10^4 t/a,输气成本为 0.10~0.15 欧元/(kg·1 000 km),项目总投资金额为 $10 \times 10^8 \sim 15 \times 10^8$ 欧元。匈牙利天然气管道公司规划了分别与斯洛伐克、罗马尼亚、斯洛文尼亚、乌克兰连接的纯氢管道(表 2),计划通过改造现有管道建设,目前正在评估现有天然气管道改输氢气的可行性^[24]。希腊计划建设与现有天然气管网并行敷设的 1 套纯氢管网,干线全长 540 km,起点位于希腊南部,贯通希腊并向北延伸至希腊与保加利亚边境,管径 900 mm,预计投资 11.2×10^8 欧元^[25],支线长 250 km,管径 900 mm,目前处于预可研阶段,计划 2029 年建成投产。

表 2 匈牙利纯氢管网组成及参数表
Table 2 Composition and parameters of pure hydrogen pipeline network in Hungary

管道名称	长度/km	设计输量/(GW·h·d ⁻¹)	设计管径/mm	设计压力/MPa	投产时间
匈牙利—斯洛伐克纯氢管道	92	100	800	7.5	2029 年
匈牙利—罗马尼亚纯氢管道	203	100	800	7.5	2029 年
匈牙利—斯洛文尼亚纯氢管道	201	30	600	7.5	2035 年
匈牙利—乌克兰纯氢管道	211	100	800	6.3	2029 年

1.1.6 德国纯氢管网

德国是欧洲地区最重要的氢能消费中心,众多纯氢管道与德国境内管道连接,为德国供应氢能。根据德国天然气运营商协会公开的信息,德国纯氢管网规划总里程 9 666 km,其中约 60% 由天然气管道改造建成,预计总投资 197×10^8 欧元,管网接收能力与外输

能力分别为 800 TW·h/a、700 TW·h/a,主要包括 Flow Hydrogen 纯氢管网、H₂Ercules 纯氢管网、捷克—德国氢能互联管道、Doing Hydrogen 纯氢管网、Green Octopus Mitteldeutschland(GO!)纯氢管道、Hyperlink 纯氢管网等。

Flow Hydrogen 纯氢管网与波罗的海、捷克、法国、

奥地利等地区的纯氢管网相连, 全长 1 100 km, 设计输量 160 TW·h/a, 由现有天然气管道改造而来。计划 2025 年完成第 1 阶段建设工作, 2028 年建成投产。H₂Ercules 纯氢管网分布于德国西部及南部, 与挪威、荷兰、比利时、法国、捷克等地区的纯氢管网相连, 全长约 1 500 km, 超过 50% 由现有天然气管道改造而来^[26], 分 3 个阶段建设, 计划 2026 年建成与挪威、比利时连通的管网, 2028 年建成与荷兰连通的管网, 2030 年建成德国境内管网, 并与法国、捷克境内纯氢管网连通。捷克—德国氢能互联管道位于德国东部, 并在德国南部与 H₂Ercules 管网连通, 全长 1 068 km, 设计输量 150×10^4 t/a, 超过 90% 由天然气管道改造而来, 其中捷克境内 150 km 管道全部由天然气管道改造而来, 计划 2030 年建成投产。GO! 纯氢管道全部位于德国境内, 连接德国中部的化工三角区、莱比锡、哈雷、马格德堡地区、赫尔姆斯泰特地区及萨尔茨吉特钢铁区, 全长 305 km, 其中 190 km 由现有天然气管道改造而来^[27], 新建 115 km 纯氢管道, 除此之外还包含 1 座 $5\,000 \times 10^4$ m³ 地下储氢设施, 目前处于预可研阶段。

1.2 欧洲纯氢管网规划特点

相比中国纯氢管道规划建设现状, 欧洲纯氢管网规划有以下特点: ①欧洲已经初步形成纯氢管网的顶层规划, 管道公司通过企业联盟或联合项目, 初步提出纯氢管网地区规划, 欧盟委员会则通过共同利益项目 (Projects of Common Interest, PCI) 清单机制进行审查, 协调欧洲整体纯氢管网规划, 最终以欧洲氢能主干管网项目或类似项目呈现; ②欧洲纯氢管网的技术参数呈现阶跃式发展, 最高设计压力 10 MPa, 最大管径 1 200 mm, 最大设计输量 200×10^4 t/a, 加速向大口径、高压、大输量方向发展, 与国内外现役纯氢管道相比迈上了新的台阶, 也远超中国当前规划阶段的纯氢管道; ③与中国新建纯氢管道不同, 欧洲陆上纯氢管网极少基于新路由新建陆上纯氢管道, 主要通过改造现有天然气管道建设, 或沿现有管道基础设施敷设新的纯氢管道, 以最大限度降低管道建设投资, 提高管道资产、土地资源利用效率。中国氢能发展起步较晚, 近年来可再生能源制氢、氢燃料电池汽车快速发展, 氢能应用前景广阔, 作为解决氢能生产地区与消费地区空间错位问题的重要手段, 纯氢管道势必在氢能产业发展中发挥无可替代的关键作用, 因此亟待开展相关研究与规划工作。

2 中国纯氢管道规划建设现状与启示

2.1 中国纯氢管道规划建设现状

中国绿氢制取集中在西部、东北、华北等风光可再生资源丰富地区, 绿氢消费则集中在东部沿海及内陆经济发达地区, 以长三角、珠三角及京津冀等城市群为代表, 氢能产业链上、下游存在严重的空间错位问题。氢能运输方式包括高压气态运输、管道气态运输、低温液态运输、有机液体运输、固体材料运输等。由于氢气体积能量密度极低且液化困难, 其运输成本远高于石油、天然气等传统能源, 根据《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》公开数据, 对于超过 500 km 的氢能运输场景, 管道运输成本仅为道路运输成本的 20%^[28]。因此, 管道运输是实现氢能大规模、远距离、连续性输送的最佳方案^[29]。目前, 氢能储运在全产业链的成本占比为 30%~40%, 是现阶段制约氢能产业链发展的瓶颈环节^[30], 亟待构建经济高效的大规模氢能管道运输及配送基础设施。

中国纯氢管道起步较晚, 发展缓慢, 现有氢气管道总里程约 400 km^[31], 尚未形成完善的氢气管道输送技术体系与指导氢能大规模利用的标准体系。目前已建纯氢管道有金陵—扬子氢气管道、巴陵—长岭氢气管道、济源—洛阳氢气管道、玉门油田输氢管道等, 设计压力均不超过 4 MPa, 管径在 219~508 mm 之间, 最大设计输量 10×10^4 t/a, 主要用于制氢厂与用气场所间的点对点输送。在纯氢管道规划方面, 中国目前尚无专门组织机构, 大多为企业自发行为。2023 年 4 月 10 日, 中国石化宣布“西氢东送”氢气管道示范工程被纳入《石油天然气“全国一张网”建设实施方案》。截至 2024 年, 中国多个省级行政区发布了氢能产业发展专项规划或实施意见, 预计到 2030 年, 中国各类输氢管道总里程将突破 5 000 km, 并在 2035 年前达到万千米级别。

“西氢东送”是中国典型的新建纯氢管道, 起于内蒙古自治区乌兰察布市, 终至中国石化北京燕山石油化工有限公司 (简称燕山石化), 全长 1 145 km, 是中国首条跨省区、大规模、长距离纯氢输送管道。随着“双碳”战略的深入推进及氢能产业的快速发展, 纯氢管道需求正在从作为化工原料的点对点输送, 向更加丰富的场景发展, 包括纯氢长输管道、纯氢输配管道等。其中, 纯氢长输管道正在向大口径、长距离、高压

力的方向发展,预计在“十五·五”期间,压力 6.3 MPa、管径 600 mm 将成为纯氢长输管道的主流配置,并进一步向压力 10 MPa、管径 1 200 mm 发展;纯氢输配管道在政府管理、标准规范等方面逐步向城镇燃气系

统靠拢^[32-33]。2024 年 8 月,山东省潍坊市高新区宝通街(潍坊电厂—潍安路)次高压输氢管道工程获得建设工程规划许可证,是中国首条按照城镇燃气工程批准建设的城镇氢气输送管道(表 3)。

表 3 中国典型纯氢管道建设与规划现状表
Table 3 Construction and planning status of typical pure hydrogen pipelines in China

管道名称	长度/km	管径/mm	设计压力/MPa	设计输量/(10 ⁴ t·a ⁻¹)	所处阶段
金陵—扬子氢气管道	32.0	325	4.0	4.00	2008 年投产
巴陵—长岭氢气管道	42.0	457	4.0	4.42	2014 年投产
济源—洛阳氢气管道	25.0	508	4.0	10.04	2015 年投产
玉门油田输氢管道	5.7	219	2.5	0.70	2024 年投产
乌兰察布—燕山石化氢气管道	1 145.0	610	6.3	10.00(一期)、50.00(二期)	安、环评价
康保—曹妃甸氢气管道	972.7	810	7.1	130.00	详细设计
潍坊电厂—潍安路次高压氢气管道	5.2	—	1.6	3.00	规划许可
中能建鹿泉制氢基地—中电科普兴电子输氢管道	49.5	168	3.9	0.40	项目备案
定州—高碑店氢气管道	164.7	—	4.0	10.00	推进中
通辽储氢示范应用项目 ^[26]	7.8	400	—	1.00	—

2.2 欧洲纯氢管网规划建设启示

2.2.1 推进纯氢管网顶层规划

除了东北、华北、西北等可再生资源丰富地区以外,海上也将成为中国未来绿氢的重要生产基地,氢能消费则集中在中东部经济与工业发达地区,纯氢管道无疑是实现绿氢大规模长距离经济输送的最佳选择,必将迎来快速发展。因此,需要借鉴欧洲纯氢管网规划经验,在国家层面推进纯氢管网顶层规划,优先考虑现有油气管道改造或沿现有油气管网规划新建纯氢管道。

2.2.2 开展油气管道改输氢气研究

随着“双碳”战略深入实施,中国油气需求与氢能需求将呈此升彼降趋势,油气管道负荷率逐渐下降,氢能长距离大规模输送需求逐渐升高。将现有油气管道改输氢气,可快速响应氢能运输需求,且建设成本仅为新建纯氢管道的 20%~30%^[8],发展潜力巨大。

为评估现有天然气管道改输氢气的适应性,国外在管道材料^[34]、输送工艺^[35]、关键设备适应性^[36]、评估方法^[37]、法律法规^[38]等方面开展了大量研究^[39],并积极推进工程验证。如英国依托国家输气系统(National Transmission System, NTS)组织实施了 Future Grid 项目,利用现有天然气管道设备,搭建了 1 套天然气管道改输氢气的试验测试平台,评估了天然气掺氢比

2%、5%、10%、20%以及改输纯氢的适应性^[40]。目前,中国针对天然气管道改输氢气的研究极少,国家管网西部管道有限责任公司目前正在开展鄯乌天然气管道局部管段在 1.5 MPa 压力工况下改输氢气的适应性研究,已经完成管道材料相容性试验、管道清管与内检测,后续将开展工艺系统、关键设备及安全保障技术的适应性研究,最终形成该管道改输氢气后的安全运维方案。未来需要不断深化研究,建立天然气管道改输氢气的技术与标准体系。

2.2.3 新建天然气管道需考虑后期改输氢气需求

参考欧洲纯氢管网规划经验及新型能源体系发展需求,新建天然气管道在设计阶段需要充分考虑未来改输氢气的适应性^[41-44],以最大限度降低未来能源转型管道改输氢气的难度与成本。目前,仅包头—林河、固阳—白云鄂博等少数天然气管道在设计时考虑了掺氢输送的需求。截至 2023 年底,中国长输油气管道总里程 18.5×10⁴ km,在“双碳”战略目标下,石油消费预计 2030 年前后达峰,天然气预计 2040 年前后达峰,长输油气管道规模将继续保持增长态势,总里程将超过 30×10⁴ km,新增里程达到 11.5×10⁴ km,并以天然气管道增量为主。这些新建的天然气管道,无疑是未来能源转型需求下氢气长距离大规模输送的重要力量,在设计阶段考虑到这一需求极为关键。

3 结论

近年来, 为了应对环境气候问题, 氢能在国际上得到广泛关注并迅速发展, 中国也在积极推进构建以可再生能源为主体的新型能源体系, 管道作为最经济的氢能长距离大规模运输方式, 势必成为新型能源体系的重要组成部分。欧洲地区纯氢管道建设历史悠久, 全球保有量占比较大, 并在“碳中和”目标下迎来高速建设期, 预计到 2030 年建成超过 30 000 km 纯氢管网, 且技术规格加速向大口径、高压、大输量方向迈进, 同时呈现出强化整体顶层规划、最大限度依托现有天然气管道基础设施等特点。基于中国纯氢管道规划建设起步较晚、相关技术尚不成熟以及天然气管道规模持续增长的现状, 建议中国借鉴欧洲纯氢管网规划建设的先进经验, 从国家层面根据经济社会发展需求及氢能产销地区分布特点开展纯氢管网顶层规划; 同时全面开展油气管道改输氢气系列支持技术研发, 为未来大量油气管道资产改造为纯氢管道提供技术储备; 新建天然气管道需要充分考虑未来改造纯氢管道的可行性, 以最大限度降低改造难度与成本为前提开展设计, 以提高管道资产利用效率, 更好地保障国家能源安全, 实现“双碳”目标。

参考文献:

- [1] Hydrogen Council, McKinsey & Company. Hydrogen insights 2023[R]. Brussels: Hydrogen Council, 2023: 4–12.
- [2] 蒋庆梅, 王琴, 谢萍, 屈向军. 国内外氢气长输管道发展现状及分析[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(12): 6–8, 64. DOI: [10.3969/j.issn.1006-6896.2019.12.002](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-6896.2019.12.002).
- JIANG Q M, WANG Q, XIE P, QU X J. Development status and analysis of long-distance hydrogen pipeline at home and abroad[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2019, 38(12): 6–8, 64.
- [3] 刘超广, 马贵阳, 孙东旭. 氢气管输技术研究进展[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 451–458. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0881](https://doi.org/10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-0881).
- LIU C G, MA G Y, SUN D X. Research progress for technology of hydrogen transportation by pipeline[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(1): 451–458.
- [4] 刘翠伟, 裴业斌, 韩辉, 周慧, 张睿, 李玉星, 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. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2022.05.002](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2022.05.002).
- LIU C W, PEI Y B, HAN H, ZHOU H, ZHANG R, LI Y X, et al. Research status and development trend of hydrogen energy industry chain and the storage and transportation technologies[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(5): 498–514.
- [5] AJANOVIC A, SAYER M, HAAS R. On the future relevance of green hydrogen in Europe[J]. Applied Energy, 2024, 358: 122586. DOI: [10.1016/j.apenergy.2023.122586](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122586).
- [6] KAKOULAKI G, KOUGIAS I, TAYLOR N, DOLCI F, MOYA J, JÄGER-WALDAU A. Green hydrogen in Europe: A regional assessment: substituting existing production with electrolysis powered by renewables[J]. Energy Conversion and Management, 2021, 228: 113649. DOI: [10.1016/j.enconman.2020.113649](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113649).
- [7] SECK G S, HACHE E, SABATHIER J, GUEDES F, REIGSTAD G A, STRAUS J, et al. Hydrogen and the decarbonization of the energy system in Europe in 2050: A detailed model-based analysis[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112779. DOI: [10.1016/j.rser.2022.112779](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112779).
- [8] European Hydrogen Backbone. Implementation roadmap-cross border projects and costs update[R]. Bruxelles: European Hydrogen Backbone, 2023: 1–10.
- [9] RAIMONDI P P, MÜNCHMEYER M. From interconnection to integration: German-Italian energy relations and the South₂ corridor[R]. Rome: IAI, 2024: 1–6.
- [10] SNAM. Piano decennale snam rete gas 2022–2031: 468/2018/R/ Gas[R]. Italy: SNAME, 2019: 108–113.
- [11] KLOPČIČ N, STÖHR T, GRIMMER I, SARTORY M, TRATTNER A. Refurbishment of natural gas pipelines towards 100% hydrogen: A thermodynamic-based analysis[J]. Energies, 2022, 15(24): 9370. DOI: [10.3390/en15249370](https://doi.org/10.3390/en15249370).
- [12] STRÖMER S, BECK A, TRANINGER M, ORSOLITS D, REUTER S. Transitioning to a renewable hydrogen system: optimal infrastructure for self-sufficient hydrogen supply in Austria by 2030[J]. Smart Energy, 2024, 15: 100151. DOI: [10.1016/j.segy.2024.100151](https://doi.org/10.1016/j.segy.2024.100151).
- [13] FRUHSTORFER C, BIENEFELD J, SCHENKE F. Status quo analysis of German airports regarding fuel infrastructure and hydrogen development opportunities: 10.15488/16807[R]. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität, Institut für Elektrische Energiesysteme, 2024: 1–9.
- [14] ORMAECHEA BARROS S. Green hydrogen production projects and their development in Spain[D]. Oulu: University of Oulu, 2024.

- [15] GRAZIANO F. IMAGHyNE French hydrogen valley: techno-economic feasibility study for industrial production and transportation of green hydrogen between Auvergne-Rhone-Alpes and Piemonte[D]. Turin: Politecnico di Torino, 2024.
- [16] 50Hertz, Amprion, Creos, EirGrid Group, Elia, Energinet, et al. Offshore TSO collaboration: unlocking the potential of the north seas[R]. Berlin: 50Hertz, 2023: 1–9.
- [17] SMIT R, WEEDA M, DE GROOT A. Hydrogen infrastructure development in the Netherlands[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(10/11): 1387–1395. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2006.10.044](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.10.044).
- [18] SAADAT Z, FARAZMAND M, SAMETI M. Integration of underground green hydrogen storage in hybrid energy generation[J]. Fuel, 2024, 371(Part A): 131899. DOI: [10.1016/j.fuel.2024.131899](https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131899).
- [19] SHI J F, XIA R X, ZHENG X Y, YAO R W, ZHENG J Y. A review on hydrogen production from ocean renewable energy and the application status[C]. Atlanta: ASME 2023 Pressure Vessels & Piping Conference, 2023: V003T04A028.
- [20] Nordion Energi, Gasgrid. Enabling change through new infrastructure: Driving decarbonization, regional green industrialization, economic development, and European energy independence[R]. Malmö: Nordion Energi, 2022: 1–3.
- [21] KARJUNEN H, LASSILA J, TYNJÄLÄ T, LAAKSONEN P, TUOMAALA M, VILPPO J, et al. Bothnian Bay hydrogen valley-research report: 134[R]. Lappeenranta: LUT University, 2021: 1–12.
- [22] LAURÉN A. Techno-economic feasibility analysis of different hydrogen transportation methods in Finland[D]. Helsinki: Aalto University, 2024.
- [23] European Clean Hydrogen Alliance. Learnbook: hydrogen imports to the EU market[R]. Brussels: European Clean Hydrogen Alliance, 2023: 27–30.
- [24] SZABO J. Hungary's hydrogen strategy: ambition for innovation within political confines: 10.48481/rifs. 2023.18[R]. Potsdam: RIFS, 2023: 1–11.
- [25] THOMADAKIS M. Cultivating the regional energy transition[C]. Istanbul: 1st Greek-Turkish Energy Forum, 2024: 1–14.
- [26] ARAÚJO DIAS A O. The transition from gas to 100% hydrogen: network planning methodologies and challenges for the energy system[D]. Porto: Universidade do Porto, 2024.
- [27] LIPIÄINEN S, LIPIÄINEN K, AHOLA A, VAKKILAINEN E. Use of existing gas infrastructure in European hydrogen economy[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(80): 31317–31329. DOI: [10.1016/j.ijhydene.2023.04.283](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.04.283).
- [28] 《中国氢能源及燃料电池产业白皮书》编委会. 中国氢能源及燃料电池产业白皮书(2019 版)[R]. 北京: 中国氢能联盟, 2019: 28.
Editorial Board of the White Paper on China's Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry. White paper on China's hydrogen energy and fuel cell industry (2019 edition)[M]. Beijing: China Hydrogen Alliance, 2019: 28.
- [29] 付强, 杨洸, 金辉, 程子豪. 中国氢能产业链技术现状及发展趋势[J]. 油气与新能源, 2024, 36(4): 19–30. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0021.2024.04.003](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0021.2024.04.003).
- FU Q, YANG G, JIN H, CHENG Z H. Technical status and development trends of hydrogen energy industry chain technology in China[J]. Petroleum and New Energy, 2024, 36(4): 19–30.
- [30] 李玉星, 刘翠伟, 彭浩平, 韩辉, 朱建鲁, 宋光春, 等. 氢能运输方式与技术发展现状及挑战[J]. 前瞻科技, 2024, 3(2): 81–93. DOI: [10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.008](https://doi.org/10.3981/j.issn.2097-0781.2024.02.008).
- LI Y X, LIU C W, PENG H P, HAN H, ZHU J L, SONG G C, et al. Current status and challenges of hydrogen energy transportation methods and technological development[J]. Science and Technology Foresight, 2024, 3(2): 81–93.
- [31] 任若轩, 游双娇, 朱新宇, 岳小文, 姜振超. 天然气掺氢输送技术发展现状及前景[J]. 油气与新能源, 2021, 33(4): 26–32. DOI: [10.3969/j.issn.2097-0021.2021.03.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.2097-0021.2021.03.006).
- REN R X, YOU S J, ZHU X Y, YUE X W, JIANG Z C. Development status and prospects of hydrogen compressed natural gas transportation technology[J]. Petroleum and New Energy, 2021, 33(4): 26–32.
- [32] 曹权, 王洪建, 秦业美, 王敏. 纯氢管道输氢技术发展现状与分析[J]. 力学与实践, 2024, 46(1): 18–27. DOI: [10.6052/1000-0879-23-355](https://doi.org/10.6052/1000-0879-23-355).
- CAO Q, WANG H J, QIN Y M, WANG M. Current status and analysis of the development of pure hydrogen pipeline hydrogen transmission technology[J]. Mechanics in Engineering, 2024, 46(1): 18–27.
- [33] 程德宝, 蔺建刚, 魏乃腾, 于雯霞, 党春蕾, 田华峰. 氢气输送管道技术发展现状[J]. 油气储运, 2024, 43(6): 624–631. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.06.003](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.06.003).

- CHENG D B, LIN J G, WEI N T, YU W X, DANG C L, TIAN H F. Review of hydrogen transmission pipeline technology development[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(6): 624–631.
- [34] ARUMUGAM G K, MALDONADO R, THAPA S, MANSFELD A, KAMAVARAM V, NAKATSUKA M A, et al. Repurposing existing natural gas pipelines for the transmission of hydrogen[C]. Houston: Offshore Technology Conference, 2024: OTC-35207-MS.
- [35] PEACE C, WAPLE N, HAGHIGHI H, COTTON H. Repurposing networks for hydrogen[C]. Abu Dhabi: ADIPEC, 2023: SPE-216844-MS.
- [36] TSIKLIOU C, HERMESMANN M, MÜLLER T E. Hydrogen transport in large-scale transmission pipeline networks: Thermodynamic and environmental assessment of repurposed and new pipeline configurations[J]. *Applied Energy*, 2022, 327: 120097. DOI: [10.1016/j.apenergy.2022.120097](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120097).
- [37] TERENCE A, IACCOZZA C, ROSSI C, SCARSCIAFRATTE D, ARCANGETTI G, ALOIGI E. Leading the energy transition: a novel approach to existing gas pipelines retrofitting for hydrogen transport[C]. Turin: SPE Europe Energy Conference and Exhibition, 2024: SPE-220011-MS.
- [38] JAYANTI S E P. Repurposing pipelines for hydrogen: legal and policy considerations[J]. *Energy Reports*, 2022, 8(S16): 815–820. DOI: [10.1016/j.egy.2022.11.063](https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.11.063).
- [39] RAGHU D. Roadmap for repurposing natural gas infrastructure for hydrogen storage and transport: a review of the opportunities and challenges[C]. Houston: Offshore Technology Conference, 2024: OTC-35217-MS.
- [40] GREEN A, MITCHELL L, ADAMS A. Evaluating the opportunity to repurpose gas transmission assets for hydrogen transportation[C]. Online: International Conference on Hydrogen Safety, 2021: 1–12.
- [41] 洪伟民, 俞欣然, 李玉星. 含水层地下储氢性能数值模拟[J]. *油气储运*, 2024, 43(10): 1109–1117. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.10.004](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.10.004).
- HONG W M, YU X R, LI Y X. Numerical simulation of underground hydrogen storage performance in aquifers[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(10): 1109–1117.
- [42] 朱建鲁, 张捷, 李玉星, 刘翠伟, 宁元星. 纯氢/掺氢管道密封圈与密封垫性能研究进展[J]. *油气储运*, 2024, 43(7): 730–739. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.07.002](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.07.002).
- ZHU J L, ZHANG J, LI Y X, LIU C W, NING Y X. Research progress on seal ring and gasket for pure hydrogen/hydrogen-enriched compressed natural gas pipeline[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(7): 730–739.
- [43] 牛帅帅, 赵杰, 李敬法, 吴小华, 宇波, 李建立. 液氢低温输送管道环空绝热技术研究进展[J]. *油气储运*, 2024, 43(4): 373–386. DOI: [10.6047/j.issn.1000-8241.2024.04.002](https://doi.org/10.6047/j.issn.1000-8241.2024.04.002).
- NIU S S, ZHAO J, LI J F, WU X H, YU B, LI J L. Research progress of annulus insulation technology for cryogenic liquid hydrogen pipelines[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2024, 43(4): 373–386.
- [44] 于蓬, 王健, 郑金凤, 张亮修, 王恒元. 氢能利用与发展综述[J]. *汽车实用技术*, 2019(24): 22–25. DOI: [10.16638/j.cnki.1671-7988.2019.24.008](https://doi.org/10.16638/j.cnki.1671-7988.2019.24.008).
- YU P, WANG J, ZHENG J F, ZHANG L X, WANG H Y. Review on hydrogen energy utilization and development[J]. *Automobile Applied Technology*, 2019(24): 22–25.
- (编辑: 刘朝阳)
-
- 基金项目:** 国家石油天然气管网集团有限公司科研项目“纯氢管道输送用管及试验平台关键技术研究”, DTXNY202302。
- 作者简介:** 赵赏鑫, 男, 1979年生, 教授级高工, 2006年博士毕业于中国石油大学(北京)机械设计及理论专业, 现主要从事管道安全输送技术研究。地址: 新疆乌鲁木齐市高新区(新市区)喀什东路街道四平路2288号创新广场F座, 830013。电话: 0991-7561115。Email: Liuling01@pipechina.com.cn
- Received: 2024-09-18
 - Revised: 2024-09-28
 - Online: 2024-10-09

