

天然气管道掺氢探讨

陈石义¹ 龙海洋² 李天雷² 廖勇² 刘武³

1. 浙江能源天然气集团有限公司, 浙江 杭州 310052;
2. 中国石油工程建设有限公司西南分公司, 四川 成都 610041;
3. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500

摘要:氢能以清洁、高效的特点被公认为未来最有潜力的能源载体,而天然气作为最清洁的化石能源正处于蓬勃发展的时期,全球已建和拟建的输送管网数量庞大,因此将H₂掺入现有天然气管网实现储运和利用是近年来国内外研究和测试的热点。通过对全球天然气掺氢研究现状、典型项目案例、技术问题与应用优势等方面的探讨,认为虽然天然气管网掺氢存在一些问题,但仍是现阶段最好的一种高效储运方式和扩大氢能使用范围的路径。应积极推进天然气管道掺氢相关技术研究攻关。

关键词:氢能;天然气;天然气管道掺氢

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2020.06.004

Discussion on Blending Hydrogen into Natural Gas Pipeline Networks

Chen Shiyi¹, Long Haiyang², Li Tianlei², Liao Yong², Liu Wu³

1. Zhejiang Energy Natural Gas Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310052, China;
2. China Petroleum Engineering & Construction Corp. Southwest Company, Chengdu, Sichuan, 610041, China;
3. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China

Abstract: Hydrogen energy is recognized as the most promising energy carrier of the future due to its clean and efficient characteristics. As the cleanest fossil energy resource, natural gas development is currently in its booming period. There are a huge number of pipeline networks built and planned around the world, so it has been a hotspot of domestic and overseas research and testing in recent years to blend hydrogen into existing natural gas pipeline network for storage, transportation and utilization. In this paper, after exploring the research status of HCNG, typical project cases, technical issues and application advantages at home and abroad, we have reached the conclusion that HCNG is still the best way for efficient storage & transportation and expanding the unitization of hydrogen energy despite the existing problems. Related technical study and issue tackling shall be pushed forward proactively.

Keywords: Hydrogen energy; Natural gas; Blending hydrogen into natural gas pipeline

收稿日期:2020-08-03

基金项目:中国石油工程建设有限公司科研项目“氢气制备、提纯、液化和储运加注技术前期研究”(CPECC-2020 KJ 06)

作者简介:陈石义(1988-),男,浙江温州人,工程师,硕士,主要从事天然气管道工程、LNG接收站的建设管理工作。E-mail: chenshiyi@zngas.com.cn

0 前言

伴随着气候变化及《巴黎协定》的签署,全球能源正在向高效、清洁、低碳、多元化的特征方向加速转型推进。世界各国的能源转型发展主要集中在太阳能、风能以及水电等可再生能源,旨在提高能源安全及减少碳排放。但可再生能源的生产具有不稳定性,且难以储存,因此可解决可再生能源调峰问题的氢能迅速崛起,其具有高效的氢电转化率、可储存、单位质量热值高、燃烧界限宽等特点,被认为是未来的重要能源载体^[1]。天然气作为最清洁的化石能源目前正处于蓬勃发展时期,全球已建和拟建的输送管网数量庞大,因此将 H₂ 掺入现有天然气管网加以利用是近年来国内研究和测试的热点。通过对全球天然气掺氢研究现状、典型项目案例、问题与优势等方面的探讨,认为虽然天然气管网掺氢目前存在一些问题,但仍是现阶段扩大氢能使用及高效运输氢的一种最好方式。

1 研究现状

截至 2019 年底,据 IEA 数据显示,全球已有 37 个示范项目正在研究天然气网络中掺氢。研究项目中包括通过天然气配送网络掺氢为家庭和企业供热可行性,测试天然气网络掺氢比例对天然气输配关键设备、材料、终端设备和电器的影响,掺氢天然气地下储存的技术和监测要求等。在欧洲,HyReady 和 HIPS-Net 等技术委员会和行业组织正在研究掺氢的标准,而欧盟委员会也在研究氢在天然气网络中的作用及相关政策。

在国内,中国石油、中国石化、中国海洋石油、中国国家电投等企业已纷纷展开天然气管道含氢相关研究工作。最新颁布的中国国家标准 GB/T 37124-2018《进入天然气长输管道的气体质量要求》首次规定天然气中最大允许含氢摩尔分数 $\leq 3\%$;中国能源行业标准 NB/T 12003-2016《煤制天然气》要求产品气中氢摩尔分数 $\leq 3\%$ 。

1.1 国外典型项目案例

1.1.1 荷兰项目

荷兰 Sustainable Ameland 项目(2008-2011 年)第一次测试了天然气掺氢的家用性能^[2]。该项目通过用同材质建设的通富氢天然气管道和通纯天然气管道,对比研究富氢天然气对管道影响。经测算,掺氢体积最高可达到 12%。

1.1.2 日本项目

日本三菱日立电力系统公司(MHPS)在 2012 年开展了体积分数 30% 氢燃料混合物的大型燃气轮机测试。其新开发的 MHPS 专有燃烧器可实现混氢天然气的稳定

燃烧。与纯天然气发电相比,使用 30% 体积分数的 H₂ 混合物,CO₂ 排放量减少了 10%。发电效率高于 60%。该系统的突出优点是除了燃烧器需要升级,其他设备不需专门改造,从而大幅降低了潜在成本。

1.1.3 俄罗斯项目

俄罗斯天然气工业公司(Gazprom)计划逐步提高通往欧洲“北溪 2 号”天然气管道中 H₂ 份额,减少 CO₂ 排放以提升其气质的竞争力。俄气进行的试点项目,负责用天然气裂解制备蓝氢工艺,该反应在高压、低温,非平衡的等离子体中进行,产生纯 H₂ 流,碳以固体形式脱落而不是以 CO₂ 形式逸出到空气中。同时俄罗斯国家原子能公司(Rosatomb)位于西伯利亚的研究院正在开发一种称为核电热解水制氢的工艺。

1.1.4 英国项目

英国首个天然气掺氢项目,天然气掺入 H₂ 比例达到 20% (体积分数)的示范项目 2019 年投入运行,斯塔福德郡基尔大学向其自有天然气管网掺入 H₂,并成功长时间地向 100 户家庭和 30 座教学楼供气。

1.2 中国典型项目

2019 年 9 月,中国国家电投的北京朝阳可再生能源掺氢示范项目是中国首个电解制 H₂ 掺入天然气项目,实现验证 H₂“制取—储运—掺混—综合利用”产业链关键技术环节的目标,填补了中国天然气管道掺氢示范项目的空白。

2 天然气掺氢主要技术问题

天然气掺氢主要考虑天然气掺混 H₂ 互换性、安全性、能量输送能力、掺氢对管道影响、掺氢对储运系统影响等方面的技术问题^[3]。

2.1 天然气掺混 H₂ 互换性

H₂ 与天然气的互换性是掺混 H₂ 使用首先需要考虑的问题。因为不同国家和地区使用的天然气气质不尽相同,故而掺氢比例有所差别。英国学者认为,运输用的天然气管道掺氢的上限是 10%,家用灶具不得高于 23%,未经改造的天然气汽轮机掺氢比例是小于 5%^[4]。比利时学者通过计算华白数得出,在比利时天然气掺氢比小于 17%^[5],家用、商用灶具能直接使用掺混气。而工业原料气的成分改变,原先使用纯天然气作为原料的工艺和流程或都必须重新评估和调整。

2.2 掺氢天然气安全性

欧盟委员会资助的 NaturalHy 项目(Florisson 2012)对利用现有天然气管网输送 H₂ 的潜在风险进行了研究。

研究发现,在适当的完整性管理系统到位的情况下,掺氢 50% 的天然气管道故障频率没有变化^[6]。但氢

和天然气混合物的着火概率增加,这是由于点火所需的最小能量显著降低和燃烧上限的增加^[7]。

在泄漏后果方面,氢气体积分数 50% 以下的混氢天然气泄漏积聚方式与纯天然气相似,没有观察到氢从混合物中分离出来。反而由于氢组份体积小、浮力大、扩散性强,导致混合物在空中更难聚集,其效果比预期好^[8]。

在爆炸后果方面,与纯天然气在密闭区域的爆炸相比,含氢少于 20% 的混氢天然气在密闭环境中爆炸的严重程度相对增加不大^[9]。在氢含量超过 40% 的混合天然气中,才可以观察到爆炸超压后果的显著增加。

在定量风险方面,与天然气输送管道爆炸相比,各氢气体积分数的含氢天然气危险程度在空间上具有一致的趋势:在靠近爆炸点处风险有增加,在远离爆炸点风险有一定程度减少,英国学者 Lowesmith B J 给出了添加 H₂ 的天然气管道对个人带来的风险计算结果,见图 1。

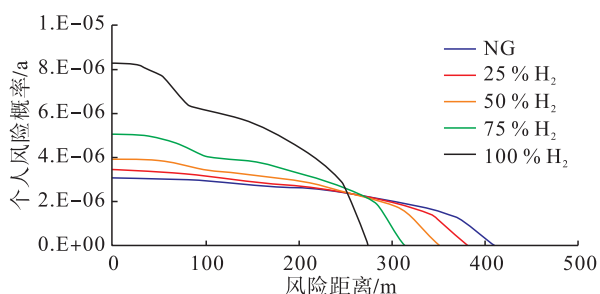


图 1 添加 H₂ 的 7 MPa, Φ 914 mm 天然气管道对个人带来的风险曲线图

Fig. 1 Risk to an individual by adding hydrogen to the natural gas pipeline of 7 MPa, Φ 914 mm

最后 NaturalHy 项目的结论认为在低浓度掺氢 (<20%) 的情况下较普通天然气的安全风险并未有显著增加;在中浓度掺氢 (<50%, >20%) 时,安全风险仍可能是中等;在高浓度掺氢 (>50%) 时,安全风险显著增加,可能难以接受^[10]。

2.3 天然气管道掺氢输送的能量影响

氢的能量密度较低,约为天然气的 30%,保持相同压力下掺氢会降低气体的能量含量。IEA 数据显示,在天然气输送管道中加入 3% 的 H₂,将使管道输送能量减少 2% 左右^[11]。庆幸的是天然气管道并不是时刻保证在 100% 设计能力下输送的,由于存在天然气用气的波动性为 H₂ 管道混输提供了经济上的可能,甚至可以增加部分管道输送的效益。

2.4 天然气掺氢对管道的影响

从 20 世纪 60 年代起,美国和前苏联就开始了氢致腐蚀机理的研究,天然气管道以钢材为主,掺氢适应性

主要表现在氢脆上^[12]。国外研究结果表明,在中低压管道系统中,由于管道运行抗拉强度相对于设计强度较低,因此对氢增强裂纹增长的影响要小得多^[13]。在全世界范围内,过去几十年中这些运输纯氢的管道均未出现操作问题。更早管道适应性证明甚至来源于 18 世纪的商业建筑,家庭、城镇路灯都使用了管道输送煤气或水煤气,这种能源通常含有 30% ~ 50% 的 H₂^[14]。

NaturalHy 项目也验证了其他金属管道,包括球墨铸铁、铸铁和锻铁以及铜管道,在天然气运输系统的供气终端操作条件下,无需担心氢损伤。关于氢老化对聚乙烯 (PE) 或聚氯乙烯 (PVC) 管道材料的影响,也没有大的担忧。大多数用于天然气管道系统的弹性体材料也可与氢相兼容。但在高压管道系统中,则提出易于发生氢损伤,另外若未采取合理的焊接措施,焊接时易产生硬块,氢损伤风险增加。

在国内,中国石油管研院对某在役管道取样,进行了煤制气管道含氢对材质的影响和控制措施研究,研究结果表明:H₂ 掺入对 X 70 管线钢母材和焊缝金属的抗拉强度、屈服强度、断后伸长率、断面收缩率几乎没有影响^[15],但降低了材料缺口试样的抗拉强度和断面收缩率,表明材料表面不存在损伤情况下,低含氢煤制气不会影响管材的承压能力。

中国海洋石油新能源研究院进行了 H₂ 腐蚀天然气长输管网模拟实验。结果表明,H₂ 含量为 16.7% 时,12 MPa 输气压力工况下,使用 X 70 钢不会产生氢腐蚀,X 70 钢机械性能也不会发生显著下降^[16]。

中国石化新粤浙管线委托中国石油大学和中国钢铁研究总院,对新疆煤制天然气的氢组分对新粤浙管线管材、管件的影响进行了专题研究。结果表明氢含量 ≤2% 时,对 X 80 钢级管材及管件无影响。

2.5 掺氢对天然气管道系统的影响

综上,虽然目前可以得出掺入低量 H₂ 对管道适应性的威胁被认为较小的结论。但是,配气系统与输气管道差异很大,不可能简单地将输气管道的完整性影响结论套用到分配系统中。管道系统如果分布在人口密集地区,可能需要根据人口密集程度,对火灾或爆炸的频率和严重程度进行重新评估。此外,配气系统的气体泄漏比输气管道更为严重,混氢供应系统的适应性管理可能需要新增安装泄漏检测传感器。

利用现有天然气管道系统来输送 H₂ 并实现安全应用的方案之一,是在最终使用天然气其之前将 H₂ 从混合物中分离出来,管网终端的系统就可以只输配合格的天然气^[17]。分子筛分离是一种成熟的分离技术,采用分子筛的 PSA 系统可以将 H₂ 提纯到 99.999% 满足燃料电池车用氢要求,但这种方法的能耗成本较大。化学镀钯

膜是可进一步发展的从天然气管道输送的含氢天然气中分离 H_2 的技术,钯膜可以提供高纯氢,但温度必须为 $300\text{ }^\circ\text{C}$,而且制造成本高昂^[18]。CMS 膜可以降低成本,并运行在 $30\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$ 间,但获得的最大 H_2 浓度仅为 98%。现在研究的前沿是将钯膜和 CMS 膜结合制成一种杂化分离系统,据相关有文献表明,这种混合系统可能比单纯 PSA 分离更便宜。最新资料显示中国石油大学发现多孔石墨烯 PG-ES 薄膜可以替代钯膜高效将 H_2 从混合气体中分离出来,将更进一步降低提纯系统的成本^[19]。

3 天然气掺氢的优势

目前,氢能利用主要聚焦在交通领域,特别是氢燃料电池汽车及其配套设施,在工业和建筑领域仍缺乏成熟的应用场景和商业模式。利用现有天然气网络掺氢是解决上述问题的有效方案,按照国内目前不足 5 000 辆示范运行的氢燃料电池公交车、客车和物流车估算,年用氢量不超过 $2\times 10^4\text{ t}$ ^[20];2025 年,按照中国氢能联盟预测 50 000 辆用车规模估算,用氢量也不到 $20\times 10^4\text{ t}$ 。而据 IEA 测算,2019 年全球天然气需求达 $4.11\times 10^{12}\text{ m}^3$,其中掺入 3% (体积分数)氢就可拉动 $1\ 100\times 10^4\text{ t H}_2$ 消纳,若这部分 H_2 主要来自电解槽,电解槽装机容量需求可达 400 GW,这会使电解槽投资成本降低 50%,有效降低可再生能源制 H_2 成本。

4 结论

天然气混合氢一直是全球 H_2 运输和规模化利用的重要研究方向,对促进氢能产业发展具有重要的意义。对此,从中国国情看,在天然气进口量持续上升的大背景下,采用可再生能源制得的 H_2 替代部分天然气有利于降低进口天然气依存度,保障其能源安全;同时,若能充分利用现有纵横东西、南北的 $8.7\times 10^4\text{ km}$ 天然气主干管网和庞大的支线管网进行低浓度掺氢运输,不仅可降低 H_2 制备、大范围运输的成本,更能有力地促进西部地区可再生能源发展,对推进中国的能源转型意义重大。

参考文献:

[1] 吴 端. 天然气掺混 H_2 使用的可行性研究[D]. 重庆:重庆大学,2018.
Wu Chang. Feasibility Study on Blending Hydrogen into Natural Gas Distribution Networks [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018.

[2] 赵永志,张 鑫,郑津洋,等. 掺氢天然气管道输送安全技术[J]. 化工机械,2016,43(1):1-7.

Zhao Yongzhi, Zhang Xin, Zheng Jinyang, et al. Safety Technology for Pipeline Transportation of Hydrogen-Natural Gas Mixtures [J]. Chemical Engineering & Machinery, 2016, 43 (1): 1-7.

[3] 叶 京,张占群. 国外天然气制氢技术研究[J]. 石化技术, 2004,11(1):50-57.
Ye Jing, Zhang Zhanqun. Foreign Technology of Hydrogen Production from Natural Gas [J]. Petrochemical Industry Technology, 2004, 11 (1): 50-57.

[4] 马向阳,黄小美,吴 端. 天然气掺氢对家用燃气灶燃烧特性的影响研究[J]. 可再生能源,2018,36(12):1746-1751.
Ma Xiangyang, Huang Xiaomei, Wu Chang. Study on the Influence of Natural Gas Hydrogenation on Combustion Characteristics of Domestic Gas Cooker [J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36 (12): 1746-1751.

[5] 罗子莹,徐华池,袁 满. 天然气掺混 H_2 在家用燃气灶上燃烧的安全性及排放性能测试与评价[J]. 石油与天然气化工,2019,48(2):50-56.
Luo Zixuan, Xu Huachi, Yuan Man. Safety and Emission Performance Test and Evaluation of Natural Gas Mixed with Hydrogen Combustion on Domestic Gas Appliances [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2019, 48 (2): 50-56.

[6] 包拉提汗·克米力. 天然气输送管道的维护保养措施[J]. 化工设计通讯,2017,43(9):45.
Polatiham · Camly. Maintenance Measures of Natural Gas Transmission Pipeline [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2017, 43 (9): 45.

[7] 刘世文,汪 洋,郑尊清,等. 天然气加氢改性对柴油引燃气体发动机排放特性和经济性影响的研究[J]. 燃烧科学与技术,2003,9(6):539-545.
Liu Shiwen, Wang Yang, Zheng Zunqing, et al. Study of the Effects of Adding Hydrogen to Diesel/CNG Dual Fuel Engine on the Emission and Fuel Consumption [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2003, 9 (6): 539-545.

[8] 单 冲. 低热值气体燃料发动机的试验研究[D]. 北京:北京交通大学,2010.
Dan Chong. The Research on the Performances of the Low Heating Value Gas Flue Engine [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2010.

[9] 陈鸿乔. 液化天然气热值调整工艺研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2019.
Chen Hongqiao. Research on Calorific Value Adjustment Process of Liquefied Natural Gas [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.

[10] Chen Shiyi, Xue Zhipeng, Wang Dong, et al. Hydrogen and Electricity Co-Production Plant Integrating Steam-Iron

