

混氢天然气管道输送技术研究

刘 凯（国家管网集团甘肃公司兰州输气分公司，甘肃 兰州 730070）

摘 要：绿色能源转型的过程中，氢能应用逐步成为焦点，将氢气与传统天然气相结合进行输送的方法，已被证明是高效传输氢气的一种策略，这种混合物的输送涉及一系列技术挑战，因为氢气的加入改变了天然气的性质，研究围绕混氢天然气在输送互换性、技术适应性以及设备可靠性等方面的课题，在国际上取得了新的研究成果。

关键词：混氢天然气；管道输送技术；能源

前言

现今，全球能源领域呈现传统能源与新能源共存的四大板块格局。能源消耗正从扩张型走向高效型，向集中化、多元化、清洁化及低碳化转变，新能源的发展势头强劲。未来能源供应体系中，能源互联网的融合作用将促进分布式能源的高效整合，形成一个综合性能源供应网络。全球氢能源应用推广需要解决的关键问题包括其制备、储存、运输及标准化制定。目前，利用可再生能源生产的氢气与天然气混合输送，通过现有天然气管网进行，已成为一种高效的应用方式。

1 国内外氢能发展计划

能源转型的全球趋势中，多个国家已经制定了国家级的氢能源发展路线。举例来说，欧盟曾在 2014 至 2020 年期间，每年为欧洲氢气联合企业提供 1 亿欧元的资助，并通过清洁能源法案推进氢能源的进步^[1]。《全面能源战略》的发布目的是 2030 年至 2040 年实现氢能源经济的全面发展。2019 年，韩国在氢能汽车销售及氢能发电机产量方面位居世界首位，加氢站建设数量排名第三。韩国还在 2020 年全球首次通过了氢经济及氢安全管理的法案。日本则提出了三个阶段的“氢能社会”发展计划。与此同时，中国也在积极推进氢能源的发展。自 2012 年起，国家对于氢能源领域的政策支持不断加强，《2012—2020 年节能与新能源汽车产业发展规划》展望了车用氢能源产业的国际化发展。“2016—2030 年能源技术创新行动计划”进一步细化了氢能发展的战略目标。

“十三五”规划中，氢燃料技术及设施建设成为重点。2018 年的行动计划中，氢能的潜力作为可再生能源转化的新方向受到关注。2020 年，氢能正式成为能源管理的一部分。金砖国家会晤上，中国承诺提前碳排放达峰及实现碳中和，氢能的快速发展扮演着至关重要的角色。

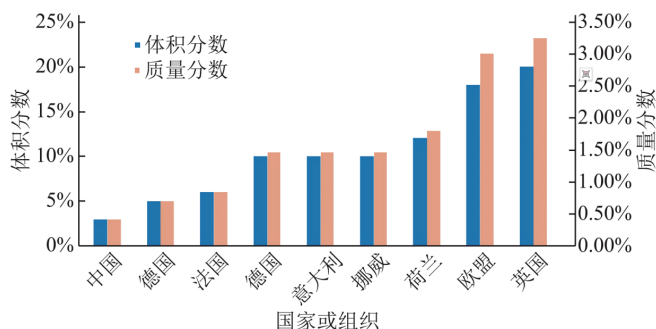


图 1 全球氢能项目中天然气混氢量

2 天然气混氢输送工艺的适应性

2.1 混氢天然气的互换性

气体传输过程中，气种更换对热流量特性的考量是核心技术要点。华白数作为衡量燃气特性的国际通用参数，其重要性不言而喻^[2]。甲烷与氢气的性质及燃烧特点差异显著，混入氢气后，天然气的燃烧性能明显改变，对燃气管网和终端用户造成影响。不同比例的混氢天然气展现出不同的燃烧指数、密度及粘度特性。氢气混合比例上升，热负荷降低，燃烧速率提升，回火风险相应增加。依据亚特兰大学者的研究，将氢气加入华白数为 $45.5\text{MJ}/\text{m}^3$ 的天然气，华白数可升至 $48.3\text{MJ}/\text{m}^3$ 。为符合本地燃具需求，需要调整氮气添加量以维持华白数在 $43.4\sim 44.4\text{MJ}/\text{m}^3$ 区间。英国多数燃具适应含 10% 氢气的天然气，但考虑灶具的华白数和回火指数限制，氢气混合比应控制在 23% 以下。

根据比利时专家的计算结果，天然气融合不超过 17% 的氢气后，能满足家庭和商业厨房设备的需求。中国目前对于混氢天然气的输送和利用尚未建立统一规范，而在进行互换性评价时，可以采用德尔布和韦弗的指数手段。按照国家标准《城镇燃气分类和基本特征》（GB/T13611—2018），我国常用的 12T 天然气，其华白数在 $45.67\text{MJ}/\text{m}^3$ 至 $54.78\text{MJ}/\text{m}^3$ 之间。实验数据表明，氢气体积分数低于 23% 的混合气体，可在终端

燃具中安全替换 12T 天然气。大部分燃气设施能够适应含有 10% 氢气的天然气，家用设施更是可适应高达 23% 的混氢比例。由于混氢天然气在不同燃具中的适用性不一，其作为燃料对终端用户的影响还需要进一步研究确认。

2.2 压缩机组及燃气轮机的适应性

混氢天然气由于其独特的物性特征，对输送管网的压力场产生了不同于传统天然气的效应，这直接关联到压缩机和燃气轮机的运行表现。对这类管网的压力分布进行详尽研究，是混氢天然气环境下设备适应性评价的核心。目前，行业实践中运用如 SPS 和 PipelineStudio 的仿真技术对管网工作状态进行模拟分析，及时发现并整改问题，以提高管网调度效能。研究表明，混入 5% 氢气的天然气管网压力降低幅度大约为 0.1%，混合气体的热值与华白数变化幅度分别限制在 3.5% 和 0.6%，仍在燃烧设备的稳定性要求内。经过优化模拟，混氢比例可提高至 6%，同时实现了能源消耗的有效减少。

混氢天然气的输送过程中，管道的输气效率受气压变化的影响显著，离心压缩机作为管网增压器，其作用对保障输气安全与效率至关重要。实验结果表明，虽然氢气的融入增加了输气潜力，但管网与压缩机共同作业时，将导致最佳工作点压力和流量降低，从而影响输送性能，例如输气量为 5500 立方米/小时，混氢比从 0 上升至 30%，压比与轴功率分别下降 20% 和 36%；在 15 摄氏度的环境下，混氢比的提升使得出站压力增加了 9.1%，最大输气量也有所增长，然而输送效率却减少了 9.2%。为维持原有的输送效率，适当增加管道的工作压力是必要的。至于燃气轮机，其作为压缩机运转的驱动力，对燃料气体组分的适应性至关重要。目前，大多数燃气轮机仅能处理含氢量不超过 5% 的天然气，而个别特殊机型能够适应超过 50% 的混氢比，甚至能燃烧含氢量达到 10% 的混合气体。

2.3 计量设备的适应性

混氢天然气输送过程中，流量计的物理特性的显著不同，例如密度与压缩比，使得对流量计的读数必须进行详尽的温度与压力补偿以及压缩比的调整，以得到准确的标况流量值。氢气混合对计量准确性产生直接影响。目前，国际上广泛开展了针对混氢天然气情境下城市输气管网终端用气表的适用性实验研究。混氢天然气在家用燃气表中的应用，存在一些显著的技术挑战。实验显示，使用高分子膜的燃气表在氢气

渗透方面表现出高敏感性，引起了计量准确性、安全风险以及流量计部件的耐用性等问题。通过 Naturalhy 项目的实施，对不同品牌燃气表的性能进行了详尽的测试，这些实验指出，尽管各品牌燃气表在测量混氢天然气时存在偏差，但都能将误差控制在 2% 以下。混氢对燃气表材质的影响相对较小，满足规定的计量精度要求。至于耐用性，实验发现，在低氢气含量条件下，燃气表的计量稳定性较高，长期磨损是计量差异的主因。对于涡轮燃气表，氢气引起的密度变化，也需要在测量中予以考虑。

对法国 GRHYD 项目中涉及居民及商业用涡轮燃气表的实地测试分析，发现天然气中氢气体积分数达到 20% 时，测量偏差有可能处于 -1% 至 2.5% 这一范围。应当指出，该测试并未在标准化的计量环境中进行。欧洲标准化机构 CEN/CENELEC 已证实，对于混合气体中氢含量最高达 10% 的情况，涡轮燃气表可进行准确读数。根据国际研究，混氢气体中氢的体积比不超过 15%，对超声波流量计的声波衰减影响轻微。目前，长输管道的计量适应性研究主要基于理论，以容积式流量计为例，其误差会随氢气体积特性和压力水平的提升而增大。具体来说，将 5% 的氢气与甲烷为主的天然气结合，在 5MPa 压力下，误差达 1.5%，而在 2.4MPa 下，误差减少至 0.5%；若天然气中甲烷含量降至 85%，混合相同比例的氢气，5MPa 下的误差增至 1.7%，当氢气含量上升至 10%，误差显著上升至 3%。

混氢天然气输送技术，国际能源署的研究项目提醒，孔板流量计的校准依赖于特定密度下的实验结果，密度的轻微变化可引起体积读数误差的相应变动。混氢天然气中，组分差异直接影响压缩率，组分分析因此成为减小计量误差的有效手段。现有的气相色谱技术主要利用氦气与天然气在导热率上的差异进行分析，但氦气的导热率与氢气相似，现有分析设备对氢气含量的准确测定存在挑战，这对压缩因子的准确估算构成影响。

3 混氢输送工艺安全分析

3.1 混氢天然气泄漏扩散的安全性

混氢天然气在输送时的安全性需要特别关注，因氢气具有较宽的爆炸极限，且泄漏易于自燃。其分子直径较甲烷小，导致在管道连接部位泄漏速度加快，安全隐患随之增加，对此类气体泄漏的防范研究成为行业热点。历史案例显示，高压氢气在富氧环境泄漏

易引发火灾。相关风险评估通过定量方法开展, GTI 及欧盟机构针对天然气中氢气含量的增加对风险等级的影响进行了深入研究, 发现氢气浓度的提升对整体风险有轻微影响。混氢天然气于封闭空间的扩散表现, Naturalhy 项目开展了两组对比实验, 分别模拟居家与商业工业环境。研究发现, 尽管混氢气体泄漏后的表现与传统天然气相似, 但氢气的快速扩散使得泄漏点附近氢气浓度迅速增至极高值, 提升了事故危险系数, 同时缩小了气体散布范围。目前天然气输送系统中, 融合的氢气浓度若不超过 20% 体积分数, 会引致轻微风险升级和事故严重性提升; 而一旦氢气体积分数超过 50%, 超压隐患将显著上升。因此, 研究混氢天然气泄漏的防治技术, 以减轻事故影响, 变得尤为重要。泄漏点燃后的火焰, 在开放空间中传播速度持续增加, 对周围环境和人员构成极大威胁。

混氢天然气输送技术的研究中, 通过实验和数值模拟工具, 例如 Fluent, 对有毒气体泄漏及其扩散的影响进行深入探讨。研究表明, 火焰在传播时若遇到障碍物, 将会引起燃烧延迟。通过实验验证了挡墙位置和角度对火焰喷射的显著影响, 合理的挡墙设计有助于减轻泄漏引起的燃烧危害。对于混氢天然气的紧急泄漏事件, 快速响应是保证生产安全的关键。混合氢气会对气体检测设备造成精度偏差, 因此校准这些设备以保证其快速反应至关重要。混合细水雾与氮气的方法在控制混氢天然气泄漏方面表现出良好的效果。随着天然气中氢含量的增加, 输送系统的整体风险提高, 对气体的安全使用提出了更高标准。对混氢天然气在不同工况下的泄漏扩散研究, 有助于制定有效的预警和防护措施。目前, 关于混氢天然气泄漏检测设备的研究仍显不足, 提高设备的检测灵敏度和优化布局将是提升现场应对速度的有效手段。

3.2 输送管道材料的适应性

氢环境下, 金属材料易受到氢影响产生的脆性与腐蚀作用, 可能引发管道崩解和系统部件失效, 从而造成安全事故。影响氢环境下设备耐腐蚀性的因素主要包括氢的侵袭、渗透现象及高温下的腐蚀过程。混氢的天然气管道中, 管材的氢脆程度与材料本身性质有关, 而且受到气体混合比和输送压力等因素的作用。对于天然气系统所用钢材, 其硬度应不超过 22HRC, 抗拉强度应限制在 793MPa 以下。对于抗拉强度超出 950MPa 的 CNG 管道用钢, 其混入氢气的比例需要控制在 2% 以下。欧洲使用的 34CrMo4 钢材对于混氢天

然气表现出良好的适应性。对于 X52 钢制管道, 适合输送体积分数不超过 10% 的混氢天然气; 而对于 X70 钢制管道, 在天然气混氢比低于或等于 10% 时, 最大操作压力应分别调低至 7MPa 和 5.38MPa。针对氢对金属的脆性影响, 聚乙烯管道成为混氢天然气输送的可行选项, 尽管存在氢气渗透, 但相对年输送量, 此渗透率可忽略。混氢天然气输送的低压系统推荐使用 PE 管道, 而高压长距离输送系统则建议采用软钢管以减少氢脆风险。氢气对钢管的影响程度随材质强度而异, 对低强度钢管的影响较小, 对高强度钢管影响较大, 如我国的西气东输项目这类大型输气管网, 普遍采用 X70、X80 高强度钢管, 且对管道压力要求较高, 相应地氢气分压也较高, 这些高强度管道在长期使用过程中, 其材料的安全性还需要深入评估。



图 2 混氢天然气管道

4 结论

混氢天然气的研究与实践, 在国际与国内均取得一定进展, 其中以 20% 的氢混合比例为主。目前, 研究界重点关注混氢输送系统在实际应用中的适配性和安全性问题。可再生能源转化技术, 如风力和光伏发电, 通过水电解工艺实现氢能的生产, 为能源的存储和使用提供了新途径, 氢能的使用, 能够有效避免燃烧过程中的碳排放问题。

参考文献:

- [1] 李凤, 董绍华, 陈林, 等. 掺氢天然气长距离管道输送安全关键技术与进展 [J]. 力学与实践, 2023, 45 (02): 230-244.
- [2] 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.

作者简介:

刘凯 (1983.5-), 男, 汉族, 山东沂水, 大学本科, 职称: 工程师, 研究方向: 天然气管道输送工艺。