

掺氢天然气输送技术现状及发展建议

唐骏琪（中国石化天然气分公司河南天然气销售中心，河南 郑州 450046）

摘要：氢能是最有潜力的碳中和清洁能源载体，天然气掺氢在管道输运和终端应用方面具有优势。本文调研了国际和国内天然气掺氢示范项目，关注天掺氢天然气管道输送关键技术，包括管道适应性、管道输送掺氢比例、安全性以及相关规范，总结了研究进展和存在问题。结合我国掺氢天然气管道输送发展现状，从管材与装备、安全保障与标准体系、顶层设计和产业布局方面提出国内发展掺氢天然气管道输送面临的挑战与建议。

关键词：掺氢；天然气管道；示范项目；关键技术；发展建议

1 引言

在众多的能量载体中，氢能具有清洁和燃烧后无污染等优势，是真正零排放的二次能源。2022年3月23日，我国出台了《氢能产业发展中长期规划（2021–2035年）》，明确氢能其产业战略的定位、目标以及产业链的部署安排等，将有力促进氢能的产供储销全生命周期产业发展。由于大规模储氢成本高、氢燃料电池技术不成熟、氢气基础设施不完善，纯氢的利用还需要相当长的时间。

氢能运输需要合适的管道网络系统，而管道网络的巨大基建费用阻碍了氢气应用的进一步推广。与车载输送和船载输送方式相比，利用天然气管道掺氢输送可充分利用我国现有在役天然气管道和城市输配气管网，管道或管网的改造成本较低。并且，当氢气掺入天然气管道时，燃烧污染物排放量能够被有效降低，减少大气环境的污染。在当前氢气储运基础设施不够完善的大背景之下，天然气管道中掺入氢气输送是实现可再生能源弃电制氢大规模、长距离、安全高效输送的潜在最佳方式。

本文关注掺氢天然气管道输送关键技术，包括管道适应性、管道输送掺氢比例、安全性以及相关规范，总结了研究进展和存在问题，对未来掺氢天然气管道输送的发展趋势进行展望并给出了发展建议。

2 天然气掺氢输送关键技术

2.1 管道适应性

我国现役天然气管道以钢管为主，尤其是中高压管道，氢气的掺入将使之更容易发生氢损伤，主要以氢脆和氢腐蚀为主。

现有研究成果多在单一变量的模拟条件下取得，而掺氢管道的氢损伤严重程度受到管道压力、掺氢比例、管材强度及环境温度等众多因素的影响，应综合考虑做进一步深入研究，并在长输管道掺入氢气后加

强对管道损伤的定期检测和处理。

由于氢气原子体积小且活性强，因此到达金属内部后，易在金属晶格内溶解，导致材料内部缺陷，使得材料的延展性和抗拉强度均发生降低，即氢脆现象^[1]。若金属材料本身存在轻微裂纹，随着氢气的富集，微裂纹在无外加应力作用下即可诱发氢致开裂。天然气管道掺氢后，管材处于高压富氢环境中，氢气浓度显著提升，使焊缝、小尺寸零件等位置的材料塑性降低，诱发裂纹甚至断裂^[2]。同时氢气也会与管材中的碳反应生成甲烷，引起脱碳，导致管材的力学性能不可逆恶化，出现氢腐蚀现象^[3]。氢脆的发生不仅与管材自身性质有关，也受到氢气浓度、管输压力等条件的影响。高、中、低压天然气输送管道的主要差异体现在管材性质和输送压力的不同，因此国内外的学者多数在以上两项指标下探究不同掺氢比对管道的影响。

目前，普遍认为输氢管材的硬度应小于22HRC、拉伸强度不宜超过793MPa。若管材为X52钢，掺氢比应低于10%；若管材为X70钢，掺氢比低于10%时的最大输送压力为7.7MPa，掺氢比高于10%时的最大输送压力不应高于5.38MPa；针对西气东输管网中广泛使用的X70和X80高等级钢，其运行压力更高，若采取掺氢输送工艺，需要进一步测试该运行压力下的掺氢比^[4]。

与传统天然气管网的工况不同，掺氢运行后由于输送介质的改变必然会引起管网内的压力变化^[5]，进而对现有管网设备产生影响。为深入探究压缩机等管网设备对不同掺氢比的适应性，需要明确掺氢输送后管网的压力分布情况。

以离心式压缩机为例，设备运行过程中叶轮直接接触掺氢天然气，极易造成氢损伤，若要降低氢脆和组件失效的风险，则必须采用性能更高的材料制作。

类似的设备或关键机构升级变相增加了掺氢天然气的输送成本。

对于超声波流量计,由于氢气和天然气性质存在较大差异,将氢气混入天然气管网后将改变管道内气体气质和流体流动状态,进而对超声波流量计的计量精度产生影响。

2.2 管道输送掺氢比例

当天然气管道中掺入氢气输送时,首先需要确定合适的掺氢比。但掺氢比受多个因素制约,目前尚无统一确定标准,不同国家对掺氢比上限的规定也不尽相同。

例如,芬兰、瑞士、奥地利、西班牙等欧洲国家规定天然气管道中掺氢比上限分别为1%、2%、4%、5%(后续如无特殊说明均指按体积分数计)。

澳大利亚可再生能源署指出,掺氢比小于10%时不会对天然气管道、设备及法规等产生明显影响。

德国规定天然气管网的掺氢比上限为2%(个别情况10%),但德国能源巨头意昂公司的Avacon子公司预计将其所属的天然气管网的掺氢比上限提高至20%。

法国规定天然气管网的掺氢比上限为6%,但从2030年起部分天然气运营商将尝试20%的掺氢比上限。

英国法律规定天然气管网中掺氢比上限为0.1%(按质量分数计),目前英国HyDeploy示范项目已成功向在役天然气管网中掺入20%的氢气。

美国国家能源局的研究表明,在现有管道和终端设备改造较小的情况下,掺混浓度较低的氢气是可行的,而掺混更高浓度的氢气会增加输送系统的风险且需要对设备进行调整。

综合国内外研究成果得出对于压缩机等管网设备而言掺氢最高比例约为10%,长输管道能接受的掺氢比随着钢级的不同有所浮动,目前研究结论得出上限约为50%。

各国规定的掺氢比例上限并不统一,在我国输气、用气设施设备受到不同氢气含量的影响尚不明确,也未形成统一的示范项目标准。因此,需要率先论证并确定符合我国发展实际的掺氢比例后,再大力发展天然气掺氢产业。其中,应综合考虑管材、设备、工艺的适应性,确定所掺氢气含量的阈限,确保天然气掺氢输送的安全性,保持对相应的技术经济的可行性平衡。

2.3 安全性分析

氢气的爆炸极限范围比作为天然气的主要成分的甲烷更大,在高压时的渗漏速率更快,泄漏自燃现象更易发生,因此,掺氢天然气泄漏后的爆炸风险也必然有所扩大。受到腐蚀、设备老化等因素的影响,相比于天然气管道,掺氢天然气管道面临的泄漏风险更大。在密闭空间内一旦发生管道泄漏,不仅会引起人的窒息,同时受外界条件的不可控性,随时有引发燃烧或爆炸的危险,燃烧的剧烈程度和火焰传播速度也会更为显著。但掺氢天然气管道的泄漏风险并不是无法控制的,明确安全界限,并制定有效的监测、预防措施是十分必要的。天然气掺氢后,气体的热值、华白数等参数将降低,火焰燃烧速度加快,对于终端用户来说,导致终端设备热负荷下降,增大使用过程的回火风险。

为此,在一定程度上,天然气掺氢不仅使得天然气长输管道和城市燃气管网运营的安全风险增加,提出了针对终端用能的更高安全性要求。目前,众多机构对掺氢天然气的事故影响进行了研究,然而多数研究基于仿真模拟软件和数值计算方法,其结论不具有普适性,缺乏实验研究,且大都局限于纯氢管道,并没有针对不同掺氢比进行研究。未来发展天然气掺氢产业需重点关注的问题便是研究掺氢天然气泄漏的扩散规律及其安全风险管控。

2.4 相关规范

国外在氢气输送领域的研究开展较早,欧美国家针对纯氢输送已颁布了相关规范,其中美国机械工程师协会发布的ASME B31.12-2019 Hydrogen Piping and Pipelines和欧洲工业气体协会发布的CGAG-5.6-2005 Hydrogen Pipeline Systems影响较为广泛,前者适用于从产氢地至用氢地间的输氢管道,但对掺氢比 $< 10\%$ 的管网系统并不适用;后者针对于管网系统中掺氢比 $> 10\%$ 的情况,或者掺氢比 $< 10\%$ 且CO含量 $> 200\mu\text{L/L}$ 的情况。

已发布的我国氢能相关国家标准有90余项,但仅有《车用压缩氢气天然气混合燃气》(GB/T 34537-2017)1项涉及了天然气掺氢技术。此外,《煤制合成天然气》(GB/T 33445-2016)中规定了煤制合成天然气一类气中的氢气含量(摩尔分数)不大于3.5%,二类气中的氢气含量不大于5%;《进入天然气长输管道的气体质量要求》(GB/T 37124-2018)规定了天然气中氢气含量(摩尔分数)不大于3%。

目前,国内与掺氢输送相关的规范还有氢气储存输送系统第1部分:通用要求》(GB/T34542.1-2017)、《氢气储存输送系统第2部分:金属材料与氢环境相容性试验方法》(GB/T34542.2-2018)、《氢气储存输送系统第3部分:金属材料氢脆敏感度试验方法》(GB/T34542.3-2018)和《氢气站设计规范》(GB50177-2005)等,具有良好的借鉴效果,有助于推动天然气管道掺氢输送专业规范的编制。此外,中国标准化协会主持的团体标准《天然气掺氢混气站技术规程》已经编制完成,填补了国内相关领域规范的空白。

3 发展建议

结合我国掺氢天然气管道的输送发展现状,从管材与装备、安全保障与标准体系、顶层设计和产业布局方面提出国内发展掺氢天然气管道输送面临的挑战与建议。

3.1 管材与关键装备研究

目前,天然气管道掺氢输送是实现氢气长距离、大量高效输送最为可行的方式。中国天然气管网分布广泛,充分利用现有管道进行掺氢输送,可以极大地节约投资成本;同时氢气作为清洁能源,可以实现可再生能源发电消纳,真正做到碳零排放,助力实现“双碳”目标。

当前我国天然气管道与掺氢天然气的相容性研究已取得阶段性成果,但管材与真实掺氢天然气的相容性数据库仍不够完善。宜搭建多个掺氢天然气环境材料力学性能原位测试平台,建立金属及非金属管材掺氢相容性测试评价方法和性能指标,研究管材在真实掺氢天然气环境下服役性能劣化规律和机理,提出掺氢天然气管道失效控制方法,为相关项目的开展及标准规范的制定提供有力支撑,并为各种掺氢天然气用的设备研发提供数据支持。

3.2 安全保障体系与标准体系

鉴于氢气与甲烷物理性质存在较大差异,掺氢天然气管网失效后的泄漏和爆炸问题较为复杂,今后需针对这些问题展开深入研究,同时数值模拟与试验结果是否吻合也亟待检验,为掺氢天然气管道输送涉及的掺氢比例选取、管道监测检查、风险评价等提供理论依据,以形成泄漏监测与防护、量化风险评价、应急处置等系统安全保障成套技术。

目前国内外尚无掺氢天然气管道输送的专用标准,应参照行业各类研究实验成果,结合我国掺氢天然气管道实情,尽快研究建立包括设计、施工、运行、

管理等全环节在内的一系列相关标准,形成一套完整且适用性强的规范标准体系,为掺氢天然气管道输送的发展保驾护航。

开展建设高标准天然气掺氢的安全与应急管理体系,探索基于数字和信息技术的天然气掺氢安全监管平台建立;加强管理部门之间的沟通和协作,形成天然气行业的可延续管理模式,明确天然气掺氢各环节中的监管部门及其责任义务。以目前天然气管网监管框架为基础,完善监管建设天然气掺氢工程的审批流程。

梳理天然气掺氢工作标准化的重点,保持氢能、天然气、城镇燃气各标准同掺氢天然气标准的协调发展:加快天然气掺氢的国家、行业标准体系建设,推动天然气掺氢的规范有条不紊的发展,大力支持管理部门开展监管工作。

3.3 顶层设计和产业布局

2020年4月,我国能源局发布了《中华人民共和国能源法(征求意见稿)》,将氢能明确纳入能源种类,这意味着氢能包括掺氢天然气产业的发展迈出了重要一步。

然而,目前我国掺氢天然气发展缺少国家层面的战略性统筹规划,相应的法律法规和产业政策等配套支撑也未完善。建议针对我国掺氢天然气产业发展现状及趋势,整合氢能、天然气、电力等产业链资源,规划部署掺氢天然气管道输送网络,因地制宜,有序推进掺氢天然气基础设施建设,促进掺氢天然气管道输送系统的可协调发展。

参考文献:

- [1] 王充,冯为健,何文德.化工设备氢腐蚀研究分析及其抑制措施[J].化工装备技术,2010,31(6):49-52.
- [2] 刘德林,陶春虎,刘昌奎,等.钢氢脆失效的新现象与新认识[J].失效分析与预防,2015,10(6):376-383.
- [3] 李敬法,苏越,张衡,等.掺氢天然气管道输送研究进展[J].天然气工业,2021,41(4):137-152.
- [4] 张小强,蒋庆梅.在已建天然气管道中添加氢气管材适应性分析[J].压力容器,2015,32(10):17-22.
- [5] 苏欣,章磊,刘佳,等.SPS与TGNET在天然气管网仿真中应用与认识[J].天然气与石油,2009,27(1):13.

作者简介:

唐骏琪(1990-),男,汉族,河南郑州人,硕士,工程师,研究方向:天然气管网规划、天然气市场研究。