



· 燃气输配与储运 ·

天然气管道掺混输送氢气适应性研究进展

陈东生¹, 杨卫涛¹, 孙云龙²

(1. 陕西省天然气股份有限公司, 陕西 西安 710000; 2. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司 第十设计研究院, 天津 300074))

摘要: 结合近年的研究进展, 综述天然气中掺混氢气对现状管材、泄漏扩散检测和用气设备性能的影响。氢气会显著降低钢材的机械性能, 导致钢材的断裂韧性降低; 掺混氢气会对管道的泄漏速率产生影响, 并通过影响压力波的传递而干扰泄漏点的检测定位; 掺混氢气还对火焰稳定性产生一定影响, 但在氢气掺混比例不大的情况下未对用气设备性能产生影响。

关键词: 天然气管道; 掺混氢气; 适应性; 管材; 泄漏; 用气设备

中图分类号: TU996.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-4416(2021)04-0A38-05

1 概述

在过去的 10 a 中, 人们越来越关注温室气体排放、全球变暖、燃料短缺等问题。氢由于可以提供高能量并有助于减少二氧化碳排放而被视为未来可持续和具有成本效益的重要能源载体^[1-2]。目前迈向氢经济的主要障碍之一是难以开发出可靠且具有成本效益的氢输送系统, 管道是目前长距离运输氢气能量损失最小和最安全的方法^[3]。但研究发现氢能的管道传输成本要比天然气高出 30%~50%, 因此, 降低氢气运输成本的方法之一便是将其与天然气混合并利用现有天然气管网进行输送^[4-5]。但是, 现有的天然气管道是以天然气为运输介质的前提设计、建造和运行的。与天然气相比, 氢气具有不同的化学和物理性质, 掺混后混合气理化性质的改变可能会对管道的完整性和耐久性产生不利影响, 并带来一些潜在的风险^[6-7]。

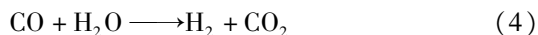
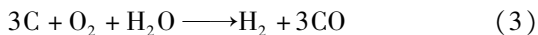
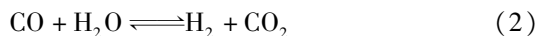
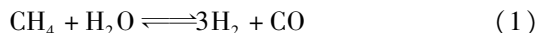
文献[8]和文献[9]表明, 将氢气和天然气以较低比例混合(氢气的体积分数<15%)是可行的, 风险没有显著增加。总的来说, 根据目前的研究, 在适当的条件和相对较低的氢气体积分数下, 掺混氢气仅对管道的运行和维护产生很小的影响。但较高体积分数的氢气可能会带来更具挑战性的问题, 包括

现状管材临氢带来的失效问题、燃气互换性问题、燃烧设备适应性问题、泄漏扩散规律及泄漏检测探测器的布置问题、火灾爆炸后果严重程度问题等^[10-11]。本文对利用现有天然气管道掺混输送氢气的适应性问题进行综述, 其中着重介绍掺混氢气对现状管材、泄漏扩散检测和用气设备性能的影响。

2 天然气和氢气性质

2.1 来源

天然气是一种存在于地下深层岩石中的化石燃料, 它是由几种烃类气体组成的混合物, 其主要组分是甲烷^[12]。与石油和天然气不同, 氢气不是化石燃料, 而是一种可以从不同的资源中获取的能量载体, 包括可再生资源如风能、太阳能及生物质能和不可再生资源。目前氢的来源主要有 3 种途径^[13-14]: 甲烷蒸汽重整(SMR), 见反应式(1)、(2); 煤或生物质的气化, 见反应式(3)、(4); 水电解, 见反应式(5)。



第一作者简介: 陈东生, 男, 高级工程师, 硕士, 从事燃气工程管理及技术工作。
收稿日期: 2020-12-29; 修回日期: 2021-01-25

2.2 理化性质差异

天然气的物理化学性质与氢气存在明显不同。氢气与甲烷的主要物理化学参数对比见表1^[15]。

表1 氢气与甲烷的主要物理化学参数对比

气体名称	氢气	甲烷
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	0.09	0.68
高热值/($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	12.095	37.782
低热值/($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	10.217	34.016
爆炸极限/%	18.2 ~ 58.9	5.7 ~ 14.0
向空气的扩散系数/($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	6.1×10^{-5}	1.6×10^{-5}
理论空气量/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	2.38	9.52

可以看到,与氢气相比,甲烷具有更大的密度、体积热值、理论空气量。氢气具有更宽的爆炸极限范围和更大的扩散系数。由于二者物理化学性质上的差异,将氢气添加到天然气管道中将导致燃烧和热性能的改变,甚至影响管道系统的材料性能,从而产生安全问题^[16-17]。

3 掺混氢气带来的适应性问题

3.1 管材临氢问题

由于氢气的冲击,氢气存在下的材料表现为脆性增加,这种现象称为氢脆。氢脆是一种严重的失效类型,氢气存在下的结构材料承受载荷的能力远低于不存在氢气时承受载荷的能力。此外,氢气还会引起材料的机械性能变化,例如延展性降低、断裂韧性降低、裂纹扩展加速等^[18-19]。在过去的50 a中,国内外学者对此进行了很多研究。文献[20]、[21]对暴露于氢气下的X52和X80钢进行测试,均发现气态氢显著降低了钢的断裂韧性,并且随着氢气压力的增加,韧性进一步降低。

文献[22]提出了一种简单的定量模型来预测钢在气态氢中的断裂韧性,断裂韧性的变化主要取决于氢气压力、温度和钢的屈服应力,测试结果表明,氢气压力越高,断裂韧性下降越快,在氢气压力相同的条件下提高氢气温度,断裂韧性的减小幅度较小。

文献[23]在气态氢5.5 MPa和21 MPa的压力下测试了两种管线钢的断裂韧性和疲劳裂纹扩展速度,结果表明,高压氢气管道的疲劳裂纹扩展速度加快,断裂韧性下降。

文献[24]对氢气体积分数分别为0、5.0%、10.0%、20.0%和50.0%的天然气管道与氢气混合物下

的X80管线钢进行了测试,结果表明,氢脆敏感性随氢气体积分数的增加而增加,X80管线钢的疲劳寿命会因添加氢气而大大降低。文献[25]研究了掺混氢气体积分数为5%和10%的氢气与二氧化碳混合气体对X80钢的影响,结果表明,氢气的存在导致疲劳裂纹扩展速度显著增大,疲劳寿命显著降低。

在输送氢气用管材方面,文献[26]对输送氢气带来的氢脆问题进行了研究,结果表明,输送高压氢气时采用软钢管道可以降低氢脆发生的概率,输送低压氢气则推荐使用PE管道。

文献[27]表明,利用天然气管道混输氢气会产生氢脆现象,而聚乙烯管不易产生氢脆现象,但是聚乙烯管存在着氢气渗透的问题,其渗透率是天然气的5倍。

文献[28]在保证掺氢管道安全运行的情况下研究了掺混氢气的体积分数与运行压力的关系,结果表明,当掺混氢气的体积分数小于10%时,管道运行压力需小于7.7 MPa;而掺混氢气的体积分数大于等于10%时,则需控制管道运行压力在5.38 MPa以下。

综上所述,氢气的存在会显著降低钢材的机械性能,导致钢材的断裂韧性降低,疲劳裂纹扩展速度加快,疲劳寿命显著降低。氢气比例、运行压力、纯净度、环境温度、管道材质等都对氢脆问题产生影响,而管道中氢气的状态不同,氢脆的机理也不同,导致对应的风险和防治方法也不同。

3.2 泄漏扩散和检测问题

关于天然气,已经对其管道的泄漏问题进行了较为充分的研究,但针对氢气或氢气与天然气混合物泄漏问题的研究却相对较少。

从泄漏率来看,研究人员一致认为由于氢气的密度更小,因此氢气的泄漏更快。文献[29]指出,在相同条件下,氢气从管道泄漏的体积流量大约比甲烷大1.3~2.8倍。文献[30]表明,在相同的压力和泄漏尺寸下,与甲烷相比,向天然气中添加氢气会产生更轻的混合物并具有更高的扩散系数和更大的泄漏流量。但文献[31]发现,利用靠近用户侧的低压天然气管道系统输送氢气与天然气的混合物,其泄漏率和输送纯天然气的泄漏率相同。

尽管任何可燃气体泄漏后都有可能自燃,但氢气尤其容易发生这种现象。文献[32]指出,当发生

泄漏时,氢气与空气的混合气极易燃烧,仅需 0.017 mJ 的点火能,而甲烷与空气的混合气燃烧所需点火能为 0.25 mJ。这种泄漏自燃的趋势,加上难以看见的火焰,使得小泄漏有潜在的爆炸危险。

从检测方法上看,目前较为常见的基于负压波、瞬态模型和声波等泄漏检测和定位方法大多是用天然气泄漏检测^[33],而针对氢气或氢气与天然气混合气的泄漏检测研究相对较少。对此,文献[34]使用降阶模型(ROM)的方法研究了水平管道中氢气与天然气混合物的瞬态流动,结果表明,其压力波曲线和振幅的变化取决于阀门关闭方式、阀门关闭时间以及函数中多边形段的数量。文献[35]提出了一种通过瞬态压力分析检测和定位管道中氢气与天然气混合物泄漏的技术,结果表明,有氢气的情况下其压力信号更好,同时氢气的质量分数对瞬态压力和泄漏流量有显著影响。

文献[34]、[35]中的假设均为瞬态等温流动,并且在动量方程中忽略了重力和倾斜的影响。文献[36]在此基础上基于瞬态压力波分析,研究了氢气与天然气混合物在倾斜管道系统中非等温流动的泄漏,并使用降阶建模技术求解控制方程。结果表明,非等温流动的泄漏量高于等温流动,氢气与天然气质量比的增加导致压力波波速的增加。同时管道倾斜角的增加会增大压力降和泄漏量,但压力波波速并未受到影响。除了以上关于氢气与天然气混合物的等温和非等温流动模型之外,文献[37]利用同质分析方法快速获得氢气与天然气混合物在倾斜管道中的泄漏位置,结果表明,该方法是高度准确的,在计算上也是非常具有吸引力并且易于实现的。

泄漏检测对于识别潜在的有害气体泄漏至关重要,并且可以通过合适的传感器进行检测。传感器通常作为气体检测系统的一部分,用于向人们发出警报。但针对天然气设计的气体检测装置不适用于天然气和氢气的混合物,在天然气中添加氢气会改变传感器的灵敏度^[38]。因此,出于安全考虑,仍有必要针对天然气与氢气混合物的传感器进行后续研究。

综上所述,氢气的存在不仅会对天然气与氢气混合气的泄漏速率产生影响,同时还会通过影响压力波的传递而影响泄漏点的检测定位,甚至会导致泄漏后混合气的爆炸危险升高。但目前针对天然气与氢气混合气的泄漏研究相对较少,值得进一步研

究。

3.3 用气设备性能问题

添加氢气后天然气燃烧特性的变化会直接影响到用气设备性能,但目前针对掺混氢气对家用燃具性能影响的研究相对较少。燃烧速度作为燃料的属性,与诸如回火之类的火焰稳定性等问题密切相关。例如回火会损坏燃烧器或导致火焰熄灭,甚至可能爆炸而引发安全问题^[39]。文献[40]在恒定体积的燃烧容器中对 CO₂ 稀释的天然气与氢混合物的层流燃烧速度和火焰稳定性进行了研究,结果表明,燃烧速度会随着初始压力和 CO₂ 体积分数的增加而降低,并随着氢含量的增加而增加。文献[41]评估了天然气与氢气混合物对家用燃具的安全性和适用性的影响,结果表明,维持热水器和烹饪炉灶等用气设备性能的天然气中氢气的最大掺混比例与天然气本身组成有关,同时对于烹饪炉灶,氢气的最大掺混比例受回火的限制。

文献[42]选择代表性的灶具燃烧器来研究不同的氢气添加量对燃烧器性能的影响,包括点火时间、火焰特性、烹饪性能、燃烧噪声、燃烧器温度、各种排放物等,实验结果表明,天然气和氢气混合物中氢气体积分数不高于 15% 时,对灶具燃烧器的燃烧性能不存在显著影响。

文献[43]基于 12T 基准天然气,测试了掺氢天然气在家用燃具上燃烧的安全性能与排放性能,结果表明,在天然气和氢气混合物中氢气体积分数不高于 20% 的情况下,掺氢天然气在家用燃具中燃烧的点火率、火焰稳定性和烟气排放性能全部合格。文献[44]基于 12T 基准天然气,测试了掺混氢气对家用燃具能效的影响,结果表明,虽然燃具在使用时会出现热工性能偏差的问题,但其能效并未发生改变,不存在明显改变燃具安全、节能和技术性能等既有状况的现象。

从以上内容可以看出,虽然氢气的掺入通过影响燃烧速度会对诸如回火之类的火焰稳定性产生一定影响,但在氢气掺混比例不大的情况下并未对家用燃具能效和安全等方面产生影响。而关于较高掺混比例的氢气对家用燃气设备性能方面的影响仍值得进一步研究。

4 结语

氢气因可以有效应对温室气体排放、全球变暖和燃料短缺等问题而受到人们广泛关注。利用现有

的天然气管道成为目前氢气广泛使用的最佳手段,但掺混氢气会对无论是管道运输过程中还是终端使用上产生影响。一方面,氢气的存在会显著降低钢材的机械性能,导致钢材的断裂韧性降低,疲劳寿命降低。另一方面,掺混氢气会对管道的泄漏速率产生影响,并通过影响压力波的传递而干扰泄漏点的检测定位,甚至会导致泄漏后爆炸危险升高。除此之外,掺混氢气还会影响燃烧速度并对诸如回火之类的火焰稳定性问题会产生一定影响,但在掺混比例不大的情况下并未对用气设备性能产生影响。尽管在过去10 a中关于氢的研究方面取得了显著进步,特别是在天然气与氢气混合物的安全运输方面,但仍需要进一步的研究为未来不断迈向氢经济提供理论基础。

参考文献:

- [1] 赵永志,蒙波,陈霖新,等. 氢能源的利用现状分析[J]. 化工进展,2015(9):3248-3255.
- [2] 张轲,刘述丽,刘明明,等. 氢能的研究进展[J]. 材料导报,2011(9):116-119.
- [3] 刘自亮,熊思江,郑津洋,等. 氢气管道与天然气管道的对比分析[J]. 压力容器,2020(2):56-63.
- [4] LIU B, LIU S, GUO S, et al. Economic study of a large-scale renewable hydrogen application utilizing surplus renewable energy and natural gas pipeline transportation in China[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2020(3):1385-1398.
- [5] 宋鹏飞,单彤文,李又武,等. 天然气管道掺入氢气的影响及技术可行性分析[J]. 现代化工,2020(7):5-10.
- [6] TABKHI F, AZZARO-PANTEL C, PIBOULEAU L, et al. A mathematical framework for modelling and evaluating natural gas pipeline networks under hydrogen injection[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2008(21):6222-6231.
- [7] 吴嫦. 天然气掺混氢气使用的可行性研究(硕士学位论文)[D]. 重庆:重庆大学,2018:1-5.
- [8] STEEN M. Building a hydrogen infrastructure in the EU[J]. Compendium of Hydrogen Energy,2016,4:267-292.
- [9] BRYNOLF S, TALJEGARD M, GRAHN M, et al. Electrofuels for the transport sector: a review of production costs[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2018,81:1887-1905.
- [10] LABIDINE - MESSAOUDANI Z, RIGAS F, HAMID M, et al. Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogen transmission via natural gas grid: a critical review[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2016,41:17511-17525.
- [11] STOLECKA K. Hazards of hydrogen transport in the existing natural gas pipeline network[J]. Journal of Power Technologies,2018(4):329-335.
- [12] 董少毅. 掺氢对天然气发动机缸内燃烧过程及性能的影响研究(硕士学位论文)[D]. 长沙:湖南大学,2016:4-7.
- [13] ABE J O, POPOOLAA P I, AJENIFUJA E, et al. Hydrogen energy economy and storage: review and recommendation[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2019,44:15072-15086.
- [14] NIKOLAIDIS P, POULLIKKAS A. A comparative overview of hydrogen production processes[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2017,67:597-611.
- [15] 赵博鑫,朱明,彭莹,等. 基于 PHAST 软件模拟氢气、天然气管道泄漏[J]. 石化技术,2017(5):48-50.
- [16] OGBE E, MUKHERJEE U, FOWLER M, et al. Integrated design and operation optimization of hydrogen commingled with natural gas in pipeline networks[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2019(4):1584-1595.
- [17] 蒙波. 含氢天然气高压输送管道材料性能劣化及失效后果研究(硕士学位论文)[D]. 杭州:浙江大学,2016:13-15.
- [18] 柴飞,李洁,陈霏佳,等. 焦炉煤气混氢气对管道管材的影响分析[J]. 煤气与热力,2013(5):A33-A35.
- [19] 白光乾,王秋岩,邓海全,等. 氢环境下 X52 管线钢的抗氢性能[J]. 材料导报,2020(22):22130-22135.
- [20] CAPELLE J, GILGERT J, DMYTRAKH I, et al. Sensitivity of pipelines with steel API X52 to hydrogen embrittlement[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2008,33:7630-7641.
- [21] BRIOTTET L, MORO I, LEMOINE P. Quantifying the hydrogen embrittlement of pipeline steels for safety considerations[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2012,37:17616-17623.
- [22] WANG Y, GONG J, JIANG W. A quantitative description on fracture toughness of steel in hydrogen gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy,2013,38:12503-12508.
- [23] MARCHI S C, SOMERDAY B, PNIBUR K A, et al. Fracture and fatigue of commercial grade API pipeline

- steels in gaseous hydrogen[J]. Pressure Vessels and Piping Division, 2010, 6: 939 – 948.
- [24] MENG B, GU C, ZHANG L, et al. Hydrogen effects on X80 pipeline steel in high – pressure natural gas/hydrogen mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42: 7404 – 7412.
- [25] 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(1): 1 – 7.
- [26] PAUL E D, STEPHANIE D. Conversion of the UK gas system to transport hydrogen[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2013, 38: 7189 – 7200.
- [27] 黄明, 吴勇, 文习之, 等. 利用天然气管道掺混输送氢气的可行性分析[J]. 煤气与热力, 2013(4): A39 – A42.
- [28] 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(10): 17 – 22.
- [29] RIGAS F, AMYOTTE P. Myths and facts about hydrogen hazards[J]. Chemical Engineering Transactions, 2013, 31: 913 – 918.
- [30] LOWESMITH B J, HANKINSON G, SPATARU C, et al. Gas build – up in a domestic property following releases of methane/hydrogen mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34: 5932 – 5939.
- [31] MEJIA A H, BROUWER J, KINNON M M. Hydrogen leaks at the same rate as natural gas in typical low – pressure gas infrastructure[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45: 8810 – 8826.
- [32] GONDAL I A. Hydrogen transportation by pipelines[J]. Compendium of Hydrogen Energy, 2016, 2: 301 – 322.
- [33] RUI Z, HAN G, ZHANG H, et al. A new model to evaluate two leak points in a gas pipeline[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2017, 46: 491 – 497.
- [34] SUBANI N, AMIN N. Analysis of water hammer with different closing valve laws on transient flow of hydrogen – natural gas mixture[J]. Abstract and Applied Analysis, 2015, 2015: 510675 – 1 – 12.
- [35] ELAOUUD S, HADJ – TAIEB L, HADJ – TAIEB E. Leak detection of hydrogen – natural gas mixtures in pipes using the characteristics method of specified time intervals[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010(5): 637 – 645.
- [36] SUBANI N, AMIN N, AGAIE B G. Leak detection of non – isothermal transient flow of hydrogen – natural gas mixture[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017, 48: 244 – 253.
- [37] CHAHARBORJ S S, ISMAIL Z, AMIN N. Detecting optimal leak locations using homotopy analysis method for isothermal hydrogen – natural gas mixture in an inclined pipeline[J]. Symmetry, 2020(11): 1 – 33.
- [38] CHAUHAN P S, BHATTACHARYA S. Hydrogen gas sensing methods, materials and approach to achieve parts per billion level detection; a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44: 26076 – 26099.
- [39] 宋占锋. 天然气/氢气/二氧化碳预混层流火焰离子电流特性研究(博士学位论文)[D]. 北京: 北京交通大学, 2019: 9 – 14.
- [40] ZHENG S, ZHANG X, XU J, et al. Effects of initial pressure and hydrogen concentration on laminar combustion characteristics of diluted natural gas – hydrogen – air mixture[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37: 12852 – 12859.
- [41] DEVRIES H, MOKHOV A V, LEVINSKY H B. The impact of natural gas/hydrogen mixtures on the performance of end – use equipment: interchangeability analysis for domestic appliances[J]. Applied Energy, 2017, 208: 1007 – 1019.
- [42] ZHAO Y, MCDONELL V, SAMUELSEN S. Influence of hydrogen addition to pipeline natural gas on the combustion performance of a cooktop burner[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44: 12239 – 12253.
- [43] 罗子萱, 徐华池, 袁满. 天然气掺混氢气在家用燃气具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(2): 50 – 56.
- [44] 严荣松, 高文学, 张杨竣, 等. 含氢天然气在家用天然气燃具上的燃烧性能测试[J]. 天然气工业, 2018(2): 119 – 124.
- (本文责任编辑: 鲁德宏)