引用格式: 谭笑, 曹燕, 刘芮君, 等. 掺氢输送对长输天然气管网标准体系的影响研究[J]. 标准科学, 2025(8):87-96.
TAN Xiao, CAO Yan, LIU Ruijun, et al. Impact of Hydrogen Blending on the Standards System of Long-Distance Natural Gas Pipeline Networks [J]. Standard Science, 2025(8):87-96.

掺氢输送对长输天然气管网标准体系的影响研究

谭笑¹ 曹燕¹ 刘芮君¹ 刘冰¹ 左丽丽² 张家禄² 阮静²

[1. 国家管网集团科学技术研究总院分公司; 2. 中国石油大学(北京)]

摘要: 【目的】探讨分析长输天然气管网掺氢后, 对原有天然气管道标准体系的影响, 并分析天然气管道标准体系的适用性。【方法】采用文献分析法, 基于我国天然气管道标准体系现状, 分析了掺氢对天然气物理化学性质、输送特性、计量准确性、材料兼容性、管道运行安全等多个方面的主要影响, 进而对相应天然气管道标准体系和相关标准的技术内容提出了完善建议。【结果】研究发现, 天然气管道标准体系总体上适用于掺氢输送, 但在重点领域需要开展专项研究, 对相关标准进行修订, 并且制定专项标准。【结论】需要开展输氢管道标准体系建设, 制定标准制修订计划, 加快标准研究, 以确保掺氢天然气的安全、高效、经济输送。

关键词: 天然气掺氢; 长输管道; 标准体系

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2025.08.012

Impact of Hydrogen Blending on the Standards System of Long-Distance Natural Gas Pipeline Networks

TAN Xiao¹ CAO Yan¹ LIU Ruijun¹ LIU Bing¹ ZUO Lili² ZHANG Jialu² RUAN Jing²

(1. Science and Technology Research Institute, PipeChina Group; 2. China University of Petroleum, Beijing)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the impact of hydrogen blending on the existing standards system for long-distance natural gas pipeline networks and assess the applicability of the standards system. [Methods] Through literature review and analysis, the study evaluates the current state of China's natural gas pipeline standards. It examines the effects of hydrogen blending on the physical and chemical properties of natural gas, transmission characteristics, metering accuracy, material compatibility, and pipeline operational safety. Based on these analyses, targeted suggestions are made to improve and supplement the technical content of relevant standards. [Results] The existing standards system for natural gas pipelines is generally applicable to hydrogen-blended transmission. However, key areas require specialized research and revisions to ensure safe and effective implementation, including the development of new, dedicated standards. [Conclusion] Establishing a dedicated hydrogen transmission standards system, along with a systematic plan for standard development and revision, is essential to support the safe, efficient, and economical transportation of hydrogen-natural gas mixtures.

Keywords: hydrogen blending; long-distance pipeline; standards system

基金项目: 本文受国家管网集团科研项目“输氢管道标准体系研究”(项目编号: JCGL202203)资助。

作者简介: 谭笑, 硕士, 高级工程师, 研究方向为油气储运。

0 引言

氢作为未来主要的可持续能源载体之一,具有巨大潜力。氢不仅不会影响全球气候,而且可以从可持续的原始能源中获得,如风能、太阳能和地热能,甚至核能等。然而,当今社会能源结构主要依赖化石燃料,可持续能源在全球能源需求中所占比重有限。向氢经济的突然转变难以实现,但如果政府构建起必要的政策框架,从当前的能源系统有规划地向完全可持续的、以氢为基础的能源供应过渡,则更具现实可行性。因此,逐步将天然气系统转换为氢气系统,不失为一项具有长远前景的选择。将现有的天然气供应与可持续产生的氢气进行混合,或许是迈向能源转型的重要一步。长距离输氢方面,管道运输被认为是最经济的方法。在国外,氢气管道研究最早可追溯至20世纪30年代末^[1]。目前全世界氢气管道长度约为4 500km。国内在氢能源的开发和利用上起步较晚,氢气长输管道的规模相对较小,目前仅在小范围内实现了氢气长输管道的应用。其中,长输天然气管网标准体系对管网系统掺氢的限制成为制约管网大规模掺氢的重要因素之一。

1 长输天然气管网标准体系现状

我国长输天然气管道标准体系主要包括国家标准、行业标准、地方标准和企业标准等。国家标准由国家标准化管理委员会及其下属各专业技术委员会等制定;行业标准由相关行业协会和行业主管部门制定,主要是为了规范天然气行业内的技术和天然气质量标准;地方标准由各省市制定,多用于当地的天然气管道工程建设,主要针对当地的特点和环境要求。企业标准由国内管道公司制定。为了与天然气国际贸易接轨,近几年国际标准也被广泛应用于中国天然气管道行业中^[2],如ISO 3183《石油天然气工业 管道输送系统钢管》等。我国的天然气管道标准体系框架涉及的专业领域包括线路工程、输送工艺、管线组件及其焊接、工程管理、站场设备

与工艺、腐蚀控制、仪表自控与通信、计量、电气工程、运行安全与完整性管理、节能与HSE管理体系等。

涉及长输管道建设的标准约200项,运行管理标准约600项。在这些标准中,大约有70%是国家标准和行业标准,超过50%是非油气管道行业标准^[3]。近几年,我国标准总体的采标率在44%左右,低于发达国家的50%~80%。我国油气管道标准中采用的国际标准和国外标准仅占20%,而且企业标准所占比例较低。国内油气管道标准转化为国际标准的数量也极为有限。

在中国的天然气管道标准体系中,GB 50251—2015《输气管道工程设计规范》、GB/T 9711—2023《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》、GB/T 51455—2023《城镇燃气输配工程施工及验收标准》和GB/T 35068—2018《油气管道运行规范》是中国天然气管道设计和运行维护的重要依据。

2 掺氢对天然气管网系统的影响

2.1 天然气掺氢对物化性质影响

天然气与氢气混合后,其物理和化学性质会发生一系列变化。在物理性质层面上,随着混合气体中的氢气含量的升高,热值随之降低,混合气体的密度和黏度会随着氢气含量的增加而降低,使得气体在管道中流动时的阻力减小,输送效率提高。此外,混合气体的热导率随着氢气含量的增加而增大。在化学性质方面,混合气体中的氢气可能与其他成分发生反应,生成新的化合物,从而改变气体的燃烧特性和腐蚀性。此外,混合气体的抗氧化性可能会下降,因此在实际应用过程中,必须重视并采取措施防止氧化腐蚀现象的发生。

2.2 天然气掺氢的输送特性影响

2.2.1 压缩因子

天然气掺入氢气后,由于密度的差异,会对压缩因子 Z 产生影响。根据GB/T 11062的定义,压缩因子是指在规定压力和温度条件下,给定质量气体的真实体积除以在相同条件下按理想气体定律

计算出的该气体的体积而得到的值。 Z 代表了实际气体与理想气体行为之间的偏离程度。在相同压力下,压缩因子 Z 随掺氢比例增加而上升,即在相同压力下,氢含量越高,压缩因子 Z 越大^[4]。

研究表明,在相同的压力和温度条件下,氢气密度低于天然气。因此,随着氢气含量的增加,混合气体的密度会逐渐降低至接近氢气的密度,且压力越高,密度降低的幅度也越大。由于氢气的压缩性低于天然气,可以观察到,随着氢气混合量的增加,压缩因子 Z 会变得更接近1.0,而当氢气含量超过70%时,压缩因子 Z 会大于1.0。这一结论在不同压力值下都适用;在15 MPa~30 MPa的压力区间,随着压力增加,压缩因子 Z 的值上升,这种现象可能是由于分子间作用力的复杂变化或模型的特殊性引起的。理解这种效应对于准确预测和有效控制高压气体混合物的行为至关重要。此外,密度和压缩性的计算采用了来自AGA8和GERG2008的相关方程^[5]。

2.2.2 密度

掺氢对气体密度的影响主要表现为在相同压力下,掺氢比例越高,混合气体的密度越低,并且随着压力的增加,密度之间的差距加大。随着掺氢比例的增加,混合气体的密度降低,导致管网压力相应下降。

然而,米兰理工大学的研究对此观点提出了补充和修正。通过实验测试发现,氢气的注入对密度分布产生了显著影响,具体表现为2个方面:(1)在管道总长度约1/3处,密度突然上升,这是由氢气注入直接引起的;(2)在出口处,密度出现波动,这主要是由压降变化导致的。由于氢气密度极低,即使注入少量氢气,混合气体的密度也会发生显著变化。这种影响对管道管理(如压缩站的控制和能耗)及取气点的客户都有重要意义。研究还发现,取气点的变化会显著影响密度变化的斜率,不同位置的密度变化速度不同:靠近注入点的地方,密度变化更快;而远离注入点的地方,密度变化会有一定延迟。此外,研究还指出,即使在停止注入氢气2 h后,在管道的最后一段($t=48$ h),氢气的存在仍然明显可见。

2.2.3 压降

在米兰理工大学的研究测试中,声速被测定为大约380 m/s。初步估计表明,压力变化能够在约2 min内穿过整个50 km的管道,而质量和流量的变化则需要大约3~4 h才能到达出口。这种时间上的差异证实了不同动态过程的合理性^[6]。

在初始时刻,整个管道充满天然气,取气点处于关闭状态,出口流量约为峰值的60%。随着时间推移至8 h,2个取气点均达到峰值,而出口流量保持在峰值的80%左右,同时管道中开始出现氢气。随着时间达到20 h,出口流量与取气点流量同时达到最大值。最终时间步长($t=48$ h)也需要考虑,因为在没有注入氢气的情况下,由于取气点关闭,流量较低,管道内仍含有氢气和天然气的混合物。因此,氢气-天然气混合物的分布几乎与天然气的分布一致。

综上所述,掺氢对长输天然气管道总体压降的影响相对有限,具体表现为:在体积流量恒定的情况下,压降会随着氢气浓度的增加而减小;在能量流恒定输送条件下,压降会随着氢含量的增加先上升到峰值,随后再减小。其中系统调整机制主要体现在以下方面^[7]。

(1) 掺氢比例与能量容量:当掺氢比例增加时,能量容量会随之降低,然而其降低幅度小于依据体积能量密度差异所预期的数值。具体的定量关系需借助实验数据与模拟结果加以确定。

(2) 压力与流量:为维持恒定的能量容量,可能需要提高管道的运行压力,且压力提升幅度与流量增加量成正比。

(3) 管道存储能力与掺氢比例:管道的存储能力会随着掺氢比例的增大而降低,至于二者间具体的函数关系,同样需要基于实验数据和模拟结果来精准推导。

2.2.4 流速

米兰理工大学对气体速度的测试结果表明^[6],氢气的注入和取气点的存在会导致气体速度发生阶跃式变化。氢气的掺混降低了气体密度,同时增加了额外的流量,从而使得气体速度有所提升。然而,最显著的影响是管道中部的大规模取气点导致

的流量减少。无论管道中是氢气与天然气的混合物还是纯天然气,取气点的存在都会导致类似的速度减小。这主要是因为取气点导致的流量减少的影响(即流量下降)远大于氢气混入对气体密度和速度的微小影响。换句话说,即便在有氢气注入的情况下,气体速度虽因氢气降低整体气体密度而略有增加,但这种增加幅度并未显著改变因取气点存在而导致的速度下降趋势。因此,气体速度的变化在2种情况下表现出一致的模式。由负载(取气点)引起的速度变化至关重要,因为它会直接影响压力降。这有助于解释混合气体与纯天然气在输送过程中的行为差异,并为系统的优化和控制提供依据。

2.3 天然气掺氢对计量的影响

为评估掺氢对计量误差的影响,本研究针对甲烷含量约99%(体积分数)的天然气混合物,在掺入5%(体积分数)氢气的条件下,对比了5 MPa和2.4 MPa压力下的理论计算体积与实际测量体积。结果显示,在5 MPa下,偏差为1.3%;在2.4 MPa下,偏差为0.5%。对于低甲烷含量(约85%体积)的天然气混合物,在5 MPa时的误差增至1.7%;在2.4 MPa时增至0.7%。当允许的氢含量提高至10%体积时,在最不利的情况下(即5 MPa下的低甲烷混合物),流量评估误差超过3%。由于氢气的体积特性,误差随着压力的增加而增加,因此,对工业客户(如大型公用事业、能源密集型工业、发电厂)的影响比对家庭用户的影响更为显著。此外,随着允许的氢含量的增加,误差也会增加。然而,只有在氢气以接近允许的最大数量连续输入管网时,这些最大误差才代表实际流量评估中的误差,而在其他情况下出现的误差较小。受制氢技术发展的影响,在全球范围内,长期注入氢气的波动甚至可能不存在,平均误差将小于上述最大值^[8]。

在评估掺氢对天然气计量误差的影响时,发现对于富含甲烷(约99%体积)的天然气混合物,在含有约5%体积的氢气条件下,计算得到的体积在5 MPa压力下比实际体积高出1.3%,在2.4 MPa压力下高出0.5%。而对于低甲烷含量(约85%体积)的天然气混合物,在5 MPa压力下误差增至1.7%,在

2.4 MPa压力下增至0.7%。

氢气的体积特性导致的误差随着压力的升高而增大,这使得工业客户(如大型公用事业、能源密集型工业和发电厂)相比家庭用户,更易受到管网中氢气混合影响。此外,随着允许氢含量的提高,误差也随之增大。

综合分析表明,向天然气管道系统中注入氢气所产生的影响是复杂的,因为气体混合物的热力学特性和传输特性的显著改变可能对现有网络基础设施和末端使用设备构成挑战。美国国家可再生能源实验室(NREL)通过研究,归纳了这些挑战及其在天然气管道系统中的具体位置。如果这些问题无法得到解决,注入氢气可能会对天然气管道的经济性、安全性和可靠性产生负面影响。在考虑注入氢气的潜在机遇时,必须考虑到设备所需的调整和网络操作程序的变化,以确保系统的安全性、可靠性和经济可行性。

2.4 天然气掺氢对材料的影响

2.4.1 金属材料

氢气与金属材料(如钢)相互作用,通过多种机制在不同的尺寸和时间范围内促使氢原子更容易进入并扩散到通常用于天然气管道的钢(低合金碳钢)的结晶网中,这一现象称为“氢脆”。氢脆会导致钢的延展性降低和缺陷扩展速度增加。管网中钢材的氢脆敏感性存在差异,这种敏感性受多种因素影响,包括管径、硫和磷化合物含量、管道的制造年份和方法、焊接技术、混合介质组分及管网运行参数(如压力、应变幅度和压力变化频率)。对于钢管的直径,初步检查表明,较小管径和低屈服强度的地区管网对氢脆的敏感性较低,而采用高钢级的大型传输主干可能更容易受到氢脆影响。

由于氢原子的体积相对于金属原子很小但并非可忽略,渗透到金属内部的氢原子会引起局部机械应变,并受到金属中晶体缺陷引起的局部机械应力的影响。因此,扩散的氢原子会被吸引到原子缺陷(如晶格中的空位或外来原子)、线性缺陷(如边缘或螺旋位错)和面缺陷(如晶粒或异相界面)中,

并在这些位置被保留,这个过程称为捕集。到达这些缺陷的氢原子,如果停留足够长的时间,可能会改变该区域金属的内聚、弹性或塑性性质,从而引发微观损伤过程,可能导致宏观材料缺陷的形成^[9]。

氢气对金属材料的影响涵盖了阴极保护过度导致的氢裂、相互作用和诱导损伤、微观结构作用和机械性能等方面。

2.4.2 非金属材料

(1) 渗透问题

相较于金属系统,氢气在塑料材料中的扩散速度通常被认为过快,这在HDPE、MDPE、PE100、PEX、PVC及Ductile PVC等材料中尤为显著。表1展示了测得的渗透系数及文献中的数值,测量结果与文献数据基本相符。鉴于本次实验研究采用的是荷兰网格中具有代表性的材料,因此,这些实验得到的渗透系数被选作进一步计算的基准。据估算,在荷兰的配气管网中,由于添加了17%的氢气,每年造成的总渗透损失约为 $26 \times 10^3 \text{ m}^3$ 。这一损失占氢气运输总量的0.0005%,因此被认为损失非常小。

表1 氢气在非金属材料中测得的渗透系数和文献值

材料	渗透系数 (ml. mm/mm ² /day/MPa)	
	测量	文献
	PE 80 高密度聚乙烯	17.1×10^{-5}
中密度聚乙烯	18.5×10^{-5}	$12.5 \times 10^{-5} \sim 23.8 \times 10^{-5}$
PE100	16.6×10^{-5}	不适用
PEXa	38.3×10^{-5}	不适用
聚氯乙烯	10.3×10^{-5}	7.81×10^{-5}
球墨 PVC	11.0×10^{-5}	不适用

总的来看,尽管氢气的扩散速度远超甲烷,但其总体渗透水平仍可被忽略。更为关键的是,氢气在塑料材料中的渗透问题并不被视为一个重大问题。

(2) 对非金属聚合物影响

迄今为止,现有文献普遍认为,在气态氢中,聚合物材料的主要问题是渗透性增加,这可能导致泄漏,而非对材料完整性的直接威胁。例如,Melaina等^[10]的研究指出,氢气的泄漏率约为天然气泄漏率的3倍。不同类型的聚合物材料之间存在显著的性

能差异,这些材料包括半结晶热塑性塑料、无定形热塑性塑料、弹性体和环氧树脂。这些聚合物的性能不仅取决于其化学结构,还受到分子量和加工历史等因素的影响。加工技术,如挤压,也会影响聚合物的性能。通过添加填料、增塑剂和交联剂可以改变或增强特定的性能。与金属不同,聚合物受静水压力的影响,且对测试条件(如温度和测试速率)非常敏感。

研究表明,在高压氢气应用场景中,聚合物材料易受多种失效和降解机制的共同影响。主要失效机制可分为3类:(1)由快速减压引发的起泡现象,(2)由长期暴露导致材料老化,(3)微观结构破坏。其中,老化特指材料在预定工作温度和压力范围内持续接触气态氢时发生的微观结构演变过程。起泡现象则源于高压环境下材料吸氢饱和后,在快速减压阶段形成气体过饱和状态,导致溶解氢气从材料基体中析出。这些析出的气体会聚集于材料内部的微孔缺陷或聚合物-填料界面处,随着压力循环次数的增加,最终引发不可逆的结构损伤。需要特别说明的是,虽然聚合物材料已广泛应用于常规天然气输送管网(工作压力相对较低),但在高压氢环境下的长期可靠性仍需系统验证。

3 掺氢对天然气管网标准体系的影响分析

总体上看,掺氢管道在线路、管道施工、公用工程及安全环保等方面与天然气管道标准差别不大,其对于天然气管道系统的影响主要体现在管道设计、焊接、计量、设备选型及完整性管理等方面。在部分领域,相关标准是需要原天然气管道标准基础上进行修订的,甚至需要针对掺氢管道进行新制定工作。在对比国内外相关标准内容后,分析出在标准体系方面需要进行补充和完善的部分主要有以下几方面。

3.1 管道设计与施工领域

3.1.1 掺氢比例

国内天然气掺氢需符合天然气气质和互换

性指标的要求。目前,主要参考的标准包括GB/T 11062、GB/T 33440、GB/T 37124和GB/T 33445。在天然气的长输管道终端,如果氢气不进行分离,可以依据GB/T 11062标准来计算相对密度和沃泊指数。根据中国石油天然气管道工程有限公司的访谈,目前国内主要参考的标准是GB/T 37124和GB/T 33445中关于气质的相关要求。GB/T 37124规定,进入天然气长输管道的气体中氢气的含量不应超过3%;GB/T 33445规定了煤制合成天然气的技术要求,其中一类要求氢气含量不超过3.0%,二类要求则由供需双方商定。而GB/T 17820标准未对氢气的气质要求进行规定。掺氢后的天然气应满足GB/T 33440给出的天然气指标要求。

根据GB/T 11062的定义,相对密度是指在规定的相同参比压力和温度条件下,气体的密度除以标准组成的干空气的密度。而根据GB/T 33440的定义,沃泊指数是指在规定的参比条件下的高位体积发热量除以相同参比条件下的相对密度的平方根。沃泊指数越高,表示在给定尺寸的孔和流速下,气体的发热值越大。因此,沃泊指数主要用于衡量气体在特定设备或系统中的替代性和适用性。如果2种气体具有相似的沃泊指数,那么它们可以在同一设备中互相替代使用,而不会对设备的性能产生负面影响。

根据GB/T 11062的方法,对仅含有甲烷和氢气的掺氢天然气进行了相对密度和沃泊指数的计算。分析结果显示,当掺氢比例超过1.0%时,相对密度已不符合指标要求;若掺氢比例达到20.0%,相对密度将降至0.46。由此可见,该标准的指标范围需进一步研究。最大允许氢浓度主要受压力波动、结构和缺陷的影响。

3.1.2 管道设计

(1) 设计压力

选择设计压力的标准或方法应基于具体的工程需求、地理位置和适用法规,以保证管道系统在设计、建造和运行过程中满足安全和可靠性的要求。GB 50251是我国输气管道工程设计规范,规定管道的设计压力应根据气源条件、用户需要、管材

质量及管道附近的安全因素,经技术经济比较后确定。EN 14161是欧洲的管道设计标准,它专注于输氢管道的环向应力分析与压力评估,并提供了计算最大环向应力和最高操作压力的方法。而ASME B31.12则是美国的管道设计标准,通过选项A和选项B提供了不同的设计方法。管道运营商通常更偏好使用选项B来确定压力,因为该方法更为灵活,允许在特定条件下放宽一些设计和测试要求^[11]。

(2) 设计强度

GB 50251、ASME B31.12和EN 14161标准在设计氢气管道时,都采用了特定的系数来提高安全性。GB 50251规定的管道强度设计系数主要参考ASME B31.8制定,这些系数的确定来源于长期的工程实践。ASME B31.12标准通过材料性能系数 H_f 来直接影响壁厚和设计压力,而EN 14161标准则是通过环向应力设计系数 f_h 来直接计算最大环向应力,进而间接计算设计压力。尽管后两者在提高安全性这一目标上是一致的,但它们在实现这一目标的方式上各有侧重。根据ASME B31.12的规定,所有结构材料的屈服极限(SMYS)超过358 MPa(52 ksi)的管道应被视为位于四级地区的管道。同时,根据API 5L的规定,X52材料的屈服极限为359 MPa,因此,由X52材料建造的管道也应被视为四级地区的管道^[12]。

ASME B31.12标准对高强度钢的容许应力限制较为宽松。在室温条件下,X52材料的基本容许应力为149.5 MPa(22 ksi),而X80材料的基本容许应力为206.4 MPa(30 ksi)。这意味着,尽管X80材料的屈服极限(SMYS)相对于X52材料增加了54%,但其容许应力的增加幅度仅为36%。

(3) 管径

在输氢管道的管径设计中,虽然原则上与天然气管道的设计相似,但由于氢气和天然气的物理性质存在差异,实际计算中需要进行相应的调整以保证安全和有效的氢气输送。具体来说,在除了流体质量以外的其他参数保持一致的情况下,纯氢管道的管径一般小于掺氢管道的管径。随着流体质量的增加,纯氢管道和掺氢管道的管径相应地逐渐增

大。纯氢管道和掺氢管道的管径随管道入口压力的提高而呈现下降趋势。

(4) 流速

在设计氢气管道流速时,应充分考虑冲蚀速度的计算结果,并据此设定具体的流速限制值,以确保管道系统的长期安全运行和运行效率。结合ASME B31.12、GB 50177和CGA标准中的建议,合理控制管道中的流速,避免高流速引发问题,是实现安全高效氢气输送的关键措施。

ASME B31.12建议将氢气管道的流速控制在峰值条件下的冲蚀速度以下,以防止对管道内壁的磨损,凸显了冲蚀速度在评估管道安全性中的关键作用。

GB 50177进一步提出了更为保守的建议,规定实际流速不应超过工作条件下冲蚀速度的50%,旨在确保管道长期安全运行。

因此,在设计氢气管道流速时,建议采用ASME B31.12或GB 50177中的公式计算冲蚀速度,将其作为设计参考基准。遵循GB 50177的建议,将实际工作条件下的流速控制在计算得到的冲蚀速度的50%以下。对阀门等流速接近声速的特殊区域进行特别设计和控制,避免流速达到或超过声速,以减少冲蚀、噪声和振动等问题。

3.1.3 气质要求

对欧美各国天然气中总硫含量的要求进行比较,结果显示,德国DVGW的标准最为严格,规定总硫含量不超过 6 mg/m^3 ,硫化氢含量不超过 5 mg/m^3 。欧洲标准紧随其后。我国GB 17820标准参考了EN 16726-2016,对总硫和硫化氢的要求分别为 20 mg/m^3 和 6 mg/m^3 ,这体现了在控制总量和关键组分方面的技术策略。随着技术进步和经济的发展,我国计划进一步降低天然气中的总硫含量,并设定了中长期目标,即将其控制在 8 mg/m^3 以下。

根据国家电投集团氢能科技发展有限公司的访谈,国内在将氢气和天然气掺混之前,已经对水含量进行了控制,即掺混前的氢气已经满足了水含量要求。然而,目前国内尚缺乏对掺混前氢气水含量的标准要求,并且在掺混后也缺少对混合物水含

量的相关规定。

国内氢气运输的气质要求尚未明确,而国外的DVGW G 260标准对输氢管道的气质要求最为全面。建议国内参考GB 17820标准,对总硫和硫化氢含量分别规定为 20 mg/m^3 (或更低,中长期目标为 8 mg/m^3)和 6 mg/m^3 ,对 CO_2 含量规定为3 mol%,这样的规定较为合理。关于水含量,国外输氢管道标准要求的范围较广,介于20~200 ppm,国内应根据自身管道的实际工作状况来确定水含量的要求。

3.1.4 材料及设备选型

(1) 压缩机选型

压缩机站是氢运输面临的挑战之一。输送介质的变化会影响压缩系统参数,如压缩机容量及压缩机站之间的距离。由于氢气的体积能量密度是天然气的1/3,为了提供相同的能量含量,输送的氢气体积必须增加3倍,从而使压缩机容量增加3倍。高速旋转受到材料强度和压缩机性能的限制,会提高离心式压缩机的性能要求。而氢气长输管道用压缩机属于中压压缩机,基于输量、压比、经济性等因素考虑,氢气管道用压缩机通常采用往复式压缩机。

(2) 管材

氢脆会使金属材料的力学性能下降,影响管道的使用寿命和安全性。

GB 4962规定氢气管道应采用无缝金属管道,禁止采用铸铁管道。其次,氢气管道与附件连接的密封垫,应采用不锈钢、有色金属、聚四氟乙烯或氟橡胶材料,禁止用生料带或其他绝缘材料。

GB 50177中要求管材应选用无缝钢管,氢气压力小于等于20 MPa时,宜采用20钢或S30408奥氏体不锈钢;氢气压力大于20 MPa时,应采用S31603奥氏体不锈钢或经试验验证具有良好氢相容性的其他材料。其次,GB 50177规定了S31603奥氏体不锈钢中的镍含量的范围是12%~28.5%。

GB/T 29729中指出氢环境下常用的金属材料有S31603、S31608、6061、4130X、X42、X52等。其次,为降低金属材料的氢脆敏感性,金属材料可使用奥氏体不锈钢和铝合金。

ASME B31.12指出,在选择管道金属材质时,应对材质进行评估,且对不同材质给出了评估时应具体考虑的因素。

CGA G-5.6指出碳钢是氢气输送管道中最常用材质,如API 5L X52(及较低强度等级)和ASTM A 106 Grade B已经在输氢管道中广泛应用。这主要在于碳钢相对较低的强度,使其对氢脆和其他脆性断裂机制具有抵抗力。

AIGA / EIGA 准则提到一些低合金钢可以焊接到输气管道上,并告诫焊接时应格外小心,但没有具体说明。根据 AIGA / EIGA 准则,奥氏体不锈钢适用于氢气环境,尤其是高压环境。该指南指出,在氢气环境下,316L型比304L型更受欢迎,因为316L具有更高的奥氏体稳定性,不易发生氢脆。这种说法似乎是错误的,因为316L和304L的主要区别在于316L中含有钼,而钼是公认的铁素体(而非奥氏体)稳定剂。其他不锈钢(铁素体钢、马氏体钢、双相钢或沉淀硬化钢)只要是在低应力和低强度范围内使用,都可以使用。“低应力”和“低强度”没有量化。

AIGA / EIGA 准则还提到了镍、铜和钴合金。镍合金和铜合金被认为容易受到氢气的损害,因此应该小心谨慎,但除了关于限制外加应力和硬度的一般指导之外,并没有具体的要求。钴合金(例如阀门上的 Stellite 硬面涂层, Stellite 是一种高性能的钴基合金)被认为是可以接受的。

针对 AIGA / EIGA 准则中“低应力”和“低强度”等未量化的概念,建议组织专业研究团队进行深入研究,结合实际工程案例和实验数据,给出明确的量化指标,以便于工程实践中的应用。

3.2 管道运行领域

3.2.1 计量

天然气组成分析的标准主要基于气相色谱法。鉴于高含量氢气对气相色谱仪的影响,包括流程改造、色谱柱选用、气体标准物质研发及在线检测等方面,建议对GB/T 13610等标准进行修订。

根据DVGW G260标准,并非所有现有的工艺气相色谱仪均具备分析氢气的的能力。若需进行分析,

则必须对这些设备进行更换或改装。目前市场上已有能够分析高达25 mol%氢气的新型号气相色谱仪,如Marquis GmbH的工艺气相色谱仪Complete-Advance和RMG Messtechnik GmbH的工艺气相色谱仪PGC 9304。

在国际领域,建议对掺氢管道和纯氢管道均采用科里奥利质量流量计。该流量计以其高精度和直接测量质量流量的能力而受到青睐,且不受流体特性的影响。鉴于氢气低密度和高声速的特性,孔板流量计可能会受到不利影响,因此需要更小的直径比(即较大的面积变化)以保持其有效性。对于超声波流量计,氢气对其高硬度材料(如钛)、润滑剂和密封剂会产生影响。DNV的研究表明,考虑到不同气体成分的影响,测量设备可能需要进行特定的调整或更换。

3.2.2 完整性管理

(1) 腐蚀防护

内涂层在缓解氢脆作用方面尚不清楚,现有腐蚀缓解方法(包括外部腐蚀涂层、阴极保护、覆层)对氢的影响尚未明确,尽管钢材中扩散的氢含量低,似乎不大可能构成重大风险。然而,这些不确定性应在检查程序中予以考虑,以确保腐蚀缓解措施的有效性。涂层和覆层在缓解氢脆方面的作用尚存在显著未知数。氢气与阴极保护之间可能的相互作用亦是一个尚未解决的问题。

(2) 阴极保护

针对输氢管道,欧洲要求重新评估阴极保护标准(-850至-1200 mV)以及过保护(比-1200 mV CSE更负的电位水平)对氢致裂纹威胁的可接受性。因为过保护被用作解决长输管道保护不足问题或应对高压交流干扰产生的腐蚀问题的一种手段。

IGEMTD1 Edition 6明确规定“对于输氢管道,管/地瞬间断电电位不应负于-1.20 Vvs Cu/CuSO₄,以减轻氢气通过管道渗透导致的管道防腐层发生阴极剥离的风险。”

(3) 缺陷评估

现有的管道评估方法未考虑氢气对材料性能的影响,特别是在体积腐蚀(如B31G、RSTRENG和

LPC)和凹痕等缺陷评估方面。凹痕的风险评估方法要求“管道运行在SMYS达30%，超过6%标称管径的明显凹痕、机械损伤、带裂纹的凹痕、深度超过2%标称管径且影响焊缝的凹痕，需定期检查维修。”

(4) 风险评价

根据荷兰国家公共卫生与环境研究所(RIVM)的规定，个体风险(LR)通过一个人在管道附近因失效而死亡的概率来确定。传统方法计算掺氢管道失效频率的局限性包括Carola确定的失效频率方法，这是一种基于天然气传输的经验，但忽略了氢气传输中的特殊情况，因此不完全适用。还有另一种方法是Bevb中的失效频率方法，是为化学品运输设定的，也不适合氢气传输。

由于氢气将在现有的天然气管道中运输，因此现有的失效频率并不准确，需要重新评估。贝叶斯网络的优势是能够根据管道参数和其他相关事件，灵活地调整失效概率，从而更好地适应不同情境。

在失效后果方面，氢气管道失效后的影响范围总体小于天然气管道，这是由于氢气释放持续时间短、释放功率低、扩散快。但氢气泄漏的点火概率始终为100%，而天然气的点火概率则取决于管道直径和压力。尽管氢气管道通常直径较小，但其点火概率可能高于天然气管道。因此，虽然氢气泄漏的影响较小，但由于其高点火概率，需更谨慎管理和评估氢气泄漏的安全性。

3.2.3 缺陷修复

IGEMTD1 条款S12.10.5不建议在氢气管道上进行带压开孔操作，除非证明该操作切实可行。针对有害凹痕的永久性现场修复要求、管道在发现机械损伤或焊接缺陷时的永久性修复标准和要求、管道在泄漏和非泄漏腐蚀区域的永久性现场修复标准和要求、硬点氢脆和应力腐蚀开裂的永久性现场修复，建议参考ASME B31.12 条款GR-5.6.1 至GR-5.9 条款。

与国内管道修复作业方面的标准GB/T 28055、SY/T 7033规定补板修复不同，ASME B31.12禁止使

用补板修复，主要因为其安全风险高、长期可靠性差、维护和检测难度大。ASME B31.12标准规定的修复方式更加可靠和安全，如全包围套筒、打磨修复等。

需要注意的是，天然气管网的维护程序不适用于掺氢管道，原因在于掺氢管道无法实现双关双泄放。若采用其他替代技术，不仅需要配备不同的设备，其实际应用效果也有待进一步研究。

4 结语

本文综合分析了掺氢对长输天然气管网标准体系的广泛影响，研究了氢气掺入天然气后，在物理化学性质、输送特性、计量准确性、材料相容性及管道运行安全等多个方面带来的显著变化。这些变化不仅要求我们对现有的管道设计和施工标准进行重新审视，还促使我们在管道运行、维护及安全管理方面采取新的策略和措施。

(1) 总体上看，掺氢天然气在长输管道标准体系方面存在标准不完善、技术储备欠缺及管理经验匮乏等问题。对此，需要通过加强国际合作、加大研发投入力度及完善相关法规和政策等措施来逐步解决。

(2) 在管道设计与施工领域，掺氢比例的科学确定、管道设计参数的合理调整、气质要求的严格把控及材料及设备选型的重新考量，都是确保掺氢天然气安全高效输送的关键。特别是氢脆现象对金属材料的影响，以及氢气在非金属材料中的渗透问题，需要采用更加严格的标准和更加先进的材料来解决。

(3) 在管道运行领域，掺氢对计量系统的准确性提出了更高要求，需要研发更加精准、可靠的计量设备和技术。同时，掺氢也增加了管道完整性管理的难度，特别是在缺陷评估和风险评价方面，需要采用更加科学、全面的方法来确保管道的安全运行。

随着氢能技术的不断进步和全球能源结构的深刻调整，掺氢天然气在长输管道中的应用将会越

来越广泛。因此,需要持续关注掺氢对长输天然气管网标准体系的影响,不断优化和完善相关技术标准和管理规范,以确保掺氢天然气的安全、高效、经济输送,为全球能源转型和可持续发展作出更大的贡献。

参考文献

- [1] 蒋庆梅,王琴,谢萍,等.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.
- [2] 王贤琳,张华,宋佳佳.绿色制造技术标准体系研究[J].标准科学, 2009(9):9-13.
- [3] 刘伯恩,李永涛,刘亚改,等.国土资源行业标准适宜性调查与评价[J].标准科学, 2009(6):61-64.
- [4] 张鹏.长输管道中外技术标准差异分析研讨会论文集[M].北京:石油工业出版社,2016.
- [5] KUNZ O , WAGNER W .The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: an expansion of GERG-2004[J].Journal of Chemical & Engineering Data, 2012, 57(11):3032-3091.
- [6] BLACHARSKI T , JANUSZ P , KALISKI M ,et al.The effect of hydrogen transported through gas pipelines on the performance of natural gas grid[J].AGH Drilling,Oil,Gas, 2016, 33:515.
- [7] 刘亭,马晓娜,王廷春.美国油气管道安全管理及启示[J].广州化工, 2015,43(8):248-250.
- [8] 于子龙,张立业,宁晨,等.天然气掺氢管道运输及终端应用[J].力学与实践, 2022,44(3):491-502.
- [9] ANDRÉ, JEAN,AURAY, et al.Design and dimensioning of hydrogen transmission pipeline networks[J].European Journal of Operational Research, 2013, 229(1):239-251.
- [10] MELAINA M W , SOZINOVA O , PENEV M .Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: A review of key issues[R].2013.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部.输气管道工程设计规范: GB 50251—2015 [S].北京:中国计划出版社,2015.
- [12] 张振永,周亚薇,张金源.国内天然气管道强度设计系数的评估研究[J].天然气工业, 2017, 37(4):116-122.