

掺氢天然气管道内气体物性变化规律研究

肖江涛, 谢宇鑫, 张 翹, 王瑞林, 沈 喆, 张熙城

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2025年10月10日; 录用日期: 2025年11月5日; 发布日期: 2025年11月14日

摘 要

在“碳达峰、碳中和”战略目标推动下,天然气管道掺氢输送成为能源体系低碳转型的重要方式。当前学界多聚焦于掺氢天然气的安全性、技术可行性及设备适用性研究,却较少关注掺氢对计量的影响。鉴于此,本研究以常规天然气与伴生气为对象,借助HYSYS软件模拟分析不同掺氢条件对管输温度、压力的影响,并依据相关标准,计算掺氢后天然气的相对密度、沃泊指数、高位发热量、压缩因子、声速及粘度等计量相关物性参数的变化规律。研究结果表明,掺氢会显著改变天然气物性参数,且现行天然气产品标准与流量计标准对掺氢浓度存在限制。

关键词

掺氢天然气, 管道物性, 计量影响

Study on the Variation Law of Gas Physical Properties in Hydrogen-Blended Natural Gas Pipelines

Jiangtao Xiao, Yuxin Xie, Chi Zhang, Ruilin Wang, Zhe Shen, Xicheng Zhang

College of Petroleum and Natural Gas Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: October 10, 2025; accepted: November 5, 2025; published: November 14, 2025

Abstract

Driven by the national goals of “carbon peaking and carbon neutrality,” the transportation of hydrogen-enriched natural gas through existing pipelines has become an important approach for low-carbon energy transition. Current research mainly focuses on the safety, technical feasibility, and equipment adaptability of hydrogen blending, while the impact on gas metering has received limited attention. In this study, conventional natural gas and associated gas are selected as research

文章引用: 肖江涛, 谢宇鑫, 张翹, 王瑞林, 沈喆, 张熙城. 掺氢天然气管道内气体物性变化规律研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(6): 1349-1357. DOI: 10.12677/me.2025.136150

objects. Using HYSYS simulation, the effects of different hydrogen blending ratios on pipeline temperature and pressure are analyzed. Based on relevant standards, the variations in metering-related physical properties—such as relative density, Wobbe index, higher heating value, compressibility factor, sound velocity, and viscosity—are calculated. The results indicate that hydrogen blending significantly alters the physical properties of natural gas, and the existing product and flowmeter standards impose constraints on allowable hydrogen concentration.

Keywords

Hydrogen-Enriched Natural Gas, Pipeline Physical Properties, Metering Impact

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

气候变化作为威胁人类共同未来的全球性议题，推动绿色低碳转型已成为国际社会的共识与行动方向。从《巴黎协定》勾勒全球碳中和愿景，到各国相继提出净零排放目标，欧盟计划 2050 年实现碳中和，美国承诺 2050 年前达成净零排放，全球减排行动正不断走向深化。在此背景下，中国确立的“3060”双碳目标，不仅是自身可持续发展的战略选择，更彰显了参与全球气候治理的责任担当。

天然气管道掺氢输送技术，作为衔接传统能源体系与氢能时代的关键纽带，既是推动我国能源结构绿色转型的核心举措，也是加速氢能产业链成熟的重要支撑，对实现“碳达峰、碳中和”目标具有不可替代的作用。而在这一技术的应用过程中，流量计作为石油化工领域不可或缺的核心测量设备，其对流体流量的精准计量，直接关系到工艺控制的稳定性、能源利用效率及整个系统的经济性，意义尤为重大。

当前全球天然气掺氢管道示范项目已进入规模化探索阶段，累计落地项目达 39 个，年输送规模高达 2900 吨，为掺氢输送技术的产业化应用奠定基础。早在 2004 年，欧盟便启动 NaturalHy 专项项目，聚焦掺氢比例对管道输送安全性、压力损失规律及终端用户设备(如工业锅炉、民用灶具)适配性的关键影响展开系统研究；2007 年，荷兰针对民生场景推进 VG2 示范项目，重点围绕天然气掺氢后的家用燃烧设备热效率、火焰稳定性及污染物排放特性开展实证分析；2014 年，法国启动 GRHYD 掺氢天然气工程，以 6% 初始掺氢比例为技术切入点，通过管网实际运行数据，系统验证天然气管路掺氢的输送兼容性、泄漏风险控制及长期运行稳定性。2019 年，中国开展朝阳可再生能源掺氢示范项目，验证氢气流量随动定比掺混的稳定性，进而建立完整的氢气制取 - 储运掺混 - 综合利用产业标准[1]-[3]。2022 年，中国建立包头 - 临河干线，设计全长 235 km 的 10% 掺氢天然气管道。

目前，已有诸多学者从掺氢安全性、技术可行性和设备适用性等方面进行了研究[4]-[8]，但对于掺氢后对计量分析产生的影响却少有研究。基于此，本研究拟探究不同掺氢比下掺混过程中温度与压力的动态变化，结合行业规范中物性参数的计算标准，系统梳理掺氢后天然气物性的变化规律，并针对当前掺氢天然气计量体系的适配性展开评估。

2. 天然气中掺氢对计量物性参数的影响分析

将氢气掺入天然气管道，是实现氢气大规模协同输送的有效途径，但氢气的引入会改变管输原有的水力工况与热力状态，进一步影响与计量相关的物性参数。基于此，以常规天然气及伴生气的气质组分

为分析基准，探究了不同掺氢比例与掺氢条件下，管输温度、压力的动态特征，以及天然气核心物性参数的变化规律。

2.1. 天然气掺氢对温度、压力的影响

本研究选用的气质组分及其摩尔分数详见表 1 [3]。通过 HYSYS 软件构建模拟模型，利用混合器实现各物流流股的耦合连接，基于 M 站工况条件 15℃、1.3 MPa 的条件下，分析不同掺氢比例下掺氢天然气的温度变化特征。

Table 1. Mole fractions of gas components for the two gas types
表 1. 两种气体气质组分的摩尔分数

气质	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	iC ₄ H ₁₀	nC ₄ H ₁₀	iC ₅ H ₁₂	nC ₅ H ₁₂	C ₆ +	N ₂	CO ₂
常规天然气	95.90	1.10	0.95	1.06	0.41	0.05	0.12	0.10	0.10	0.21
伴生气	83.50	5.70	6.40	1.10	0.60	0.32	0.01	0.12	0.01	2.24

目前，天然气物性计算方程主要有 BWRS、SRK、PR 以及 GERG08，其中 BWRS 拥有更好的适用性和精确度，能有效描述氢气的高扩散性和强非理想气体特征，因此对于混合气体的物性计算模拟使用 BWRS 方程。

不同掺氢比的掺氢天然气温度变化规律如图 1 所示。在不同掺氢比时，2 种曲线变化趋势相同。在掺氢比较低时，呈现下降趋势；在掺氢比为 40%时，温度降到最低值。达到最低值后，随着掺氢比的继续增大，掺氢天然气温度开始回升，回升速率基本保持一致。对两种天然气的气质组分进行分析可知，天然气中甲烷含量越高，掺氢后温度变化速率越小，掺氢比达到 40%时可达到的最低温度越高。

在低掺氢区(掺氢比≤40%)，掺入氢气主要降低混合气的比热容量，使在既定工况下表现为温度下降。当掺氢比进一步增加时，氢气自身的热力学特性(如其 J-T 行为、较高的比热比 γ、以及对 Z 的主导影响)开始主导混合物整体行为，这些特性倾向于抑制降温甚至产生回升，于是温度开始上升。

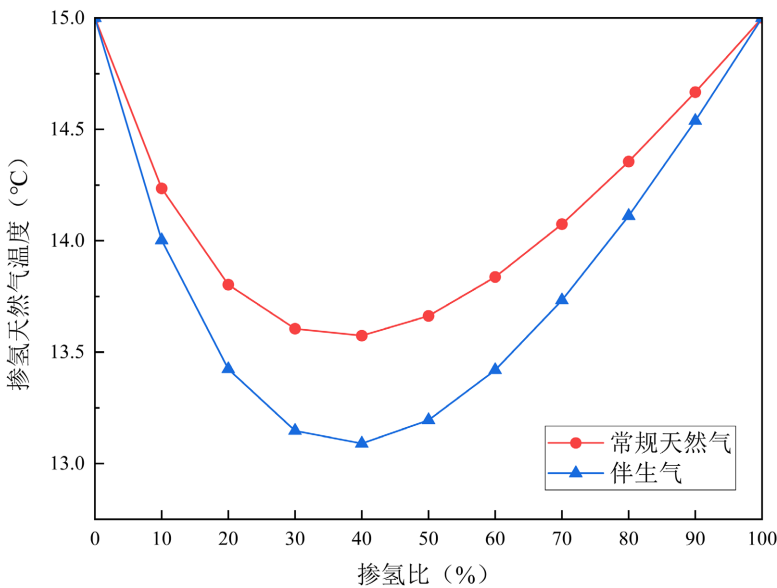


Figure 1. Temperature variation curve of hydrogen-enriched natural gas
图 1. 掺氢天然气温度变化曲线

以常规天然气为例,分析相同压力不同温度和相同温度不同压力情况下,掺氢天然气温度随掺氢比的变化规律,如图2所示。

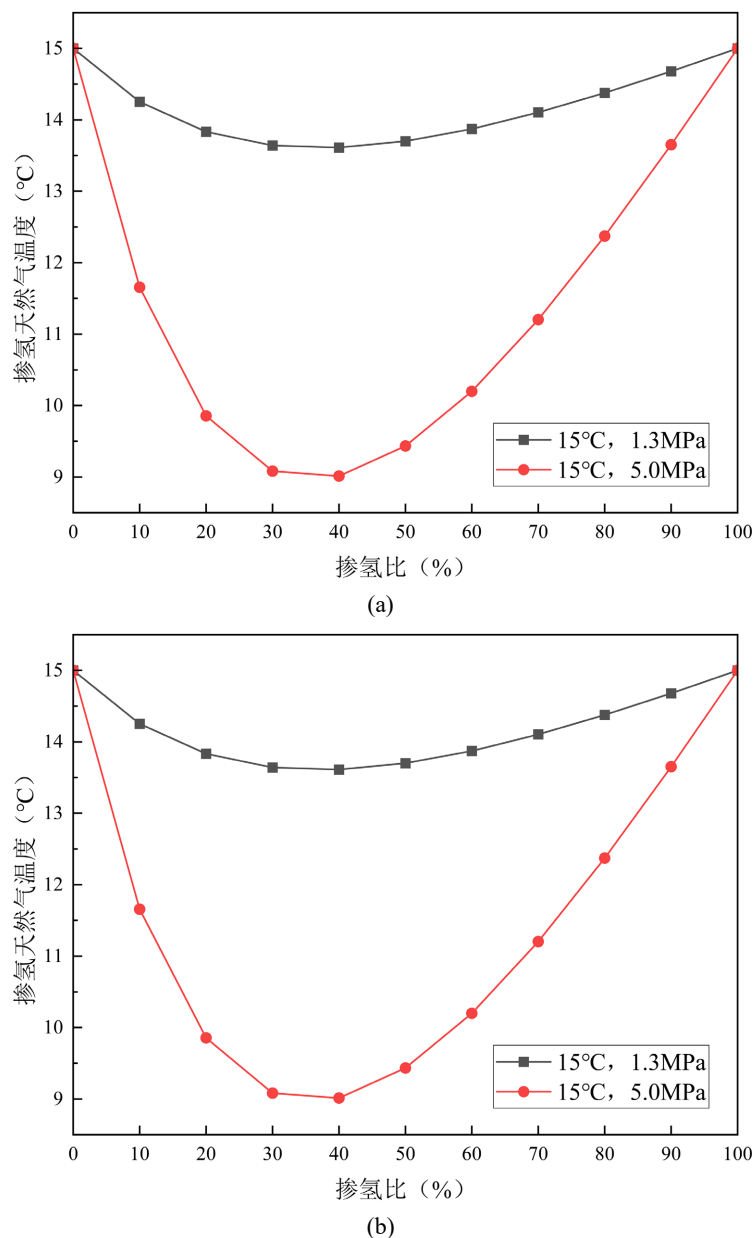


Figure 2. Temperature variation of hydrogen-enriched natural gas under different operating conditions. (a) same temperature, different pressures; (b) same pressures, different temperature

图 2. 不同工况下的掺氢天然气温度变化曲线。(a) 相同温度、不同压力; (b) 相同压力、不同温度

在温度相同,压力不同情况下,压力越大,气体的非理想性(分子间相互作用、压缩因子偏离)和碰撞频率越显著,导致掺氢后热力学响应放大,所以温度随掺氢比的变化更剧烈,最低值更低;当压力较小时,混合气体接近理想气体,气质组分变化主要表现为比热和平均分子量变化,曲线平缓。

在相同压力下改变温度,掺氢比对温度曲线的总体形状通常保持一致,因为气质组分改变主要影响混合气体的平均分子量和混合比热,而这些效应相对温度变化的敏感性较小。

2.2. 天然气掺氢对相对密度、沃泊指数和高位发热量的影响

不同掺氢浓度下的相对密度、沃泊指数和高位发热量计算参考 GB11062-2020 计算[9] [10]。在相同掺氢比下,若基础天然气中甲烷含量越低(即重烃含量越高),初始的相对密度越大。当掺氢比非常高时,混合气体中氢气占主导,所有不同起始气质的相对密度都趋向由氢气主导的较低值,因此相对密度逐渐趋同。如图 3 所示随掺氢比的升高,掺氢天然气的相对密度呈逐渐下降趋势;且在相同掺氢比下,气质中甲烷含量越低,其相对密度越大。当掺氢比较高时,不同气质组分的掺氢天然气,其相对密度会逐渐趋近一致。

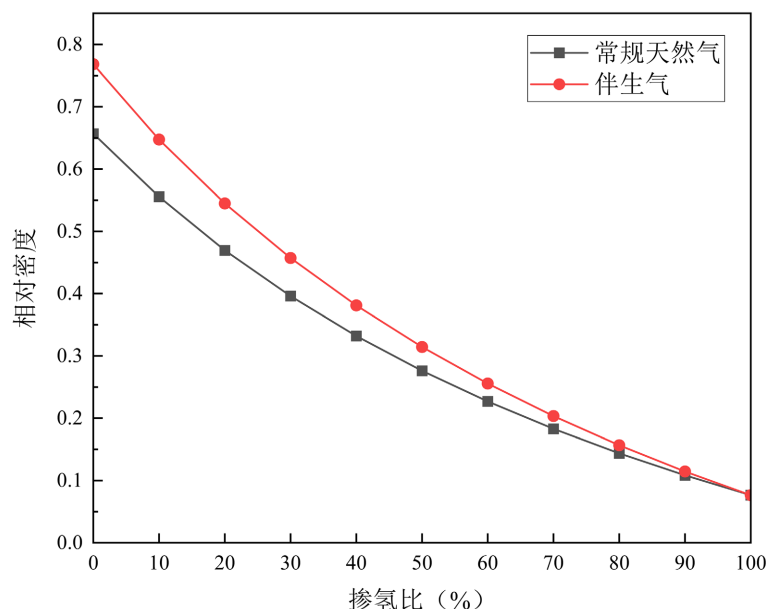


Figure 3. Relative density variation curve of hydrogen-enriched natural gas

图 3. 掺氢天然气相对密度变化曲线

沃泊指数是燃气输配、燃烧设备设计及燃气种类替换的重要技术指标,广泛应用于天然气、液化石油气、人工煤气等领域。燃气燃烧时的热负荷(单位时间释放的热量)不仅与热值相关,还与燃气的流动特性(受密度影响)有关。沃泊指数综合了这两个因素,沃泊指数越接近的燃气,在相同燃烧设备中产生的热负荷和燃烧工况越相似,互换性越好。

高位发热量的下降引起的沃泊指数的下降在数值上超过相对密度下降带来的沃泊指数的提高,因此沃泊指数总体下降。由图 4 可得,掺氢天然气的沃泊指数随着掺氢比的增大不断降低,两种气质的降低幅度基本一致,都在 16%左右。

每摩尔氢的热值远低于甲烷的体积热值。因此,掺氢比与高位发热量呈线性反相关,如图 5 所示,随着掺氢比的增大,高位发热量逐渐降低。

2.3. 天然气掺氢对压缩因子和声速的影响

压缩因子是天然气工况体积流量向标况体积流量换算的核心参数,同时对天然气储量核算、地层开发方案制定具有重要参考价值。天然气压缩因子的计算通常依据 GB/T17747.2-2011 标准,采用其中规定的 AGA8-92DC 方程。天然气声速的计算常参照 AGA10 号报告;GB/T30491.1-2014 则等同采用 ISO20765-1:2005 中的计算方法。需要说明的是,该国标采用的方法与 AGA10 号报告均以 AGA8-92DC 方程为理论

基础, 因此二者得出的声速计算结果是一致的。

ISO20765-2:2015 中物性参数的计算采用 GERG-2008 方程[11][12]。表 2 是两种计算方程的压缩因子计算方法适应范围。由表 2 得出 GERG-2008 状态方程计算方法对于掺氢天然气的不同温度、压力及掺氢浓度适应性更强。GERG-2008 状态方程所允许的最大掺氢比为 40%, 基于此, 在对掺氢后天然气的压缩因子与声速进行分析时掺氢比范围为 0%~40%。

如图 6 和图 7 所示, 掺氢后, 氢气极弱的分子间作用力显著削弱了混合气体的平均吸引力导致压缩因子增大, 同时其极轻的分子质量和较高的比热容比共同作用, 大幅提升了声速。

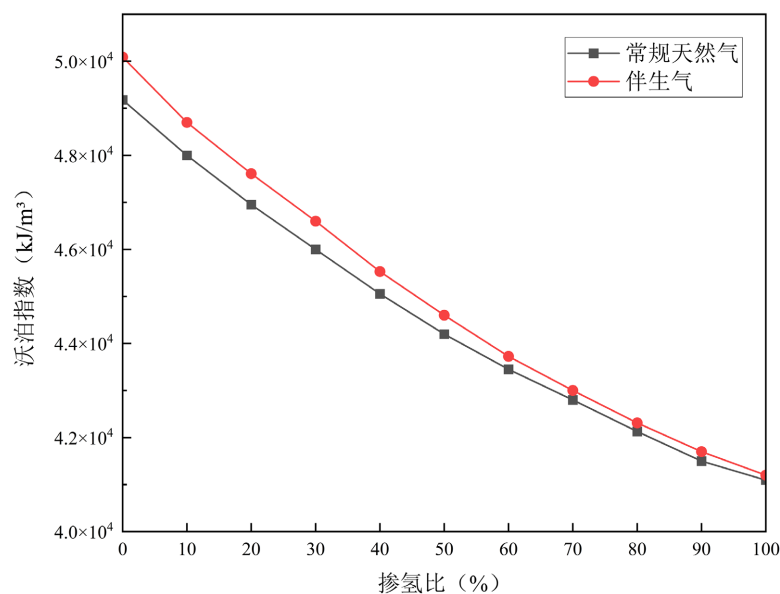


Figure 4. Wobbe index variation curve of hydrogen-enriched natural gas
图 4. 掺氢天然气沃泊指数变化曲线

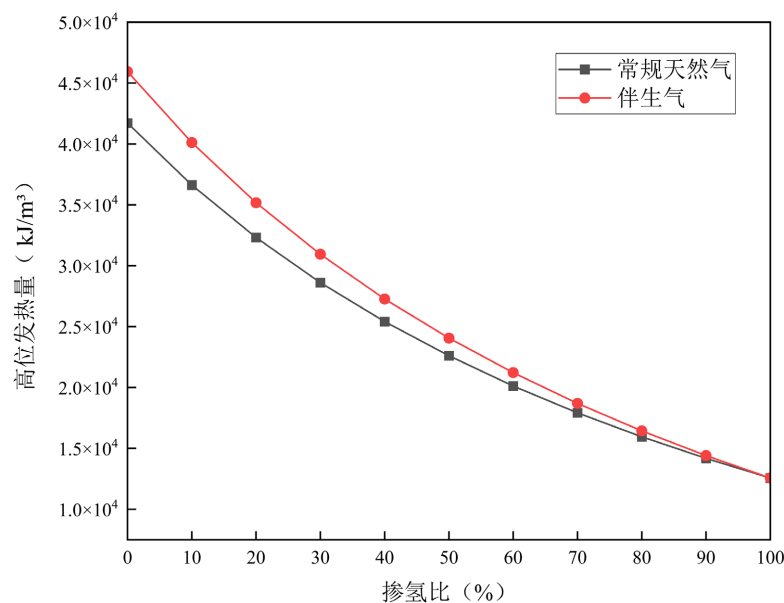
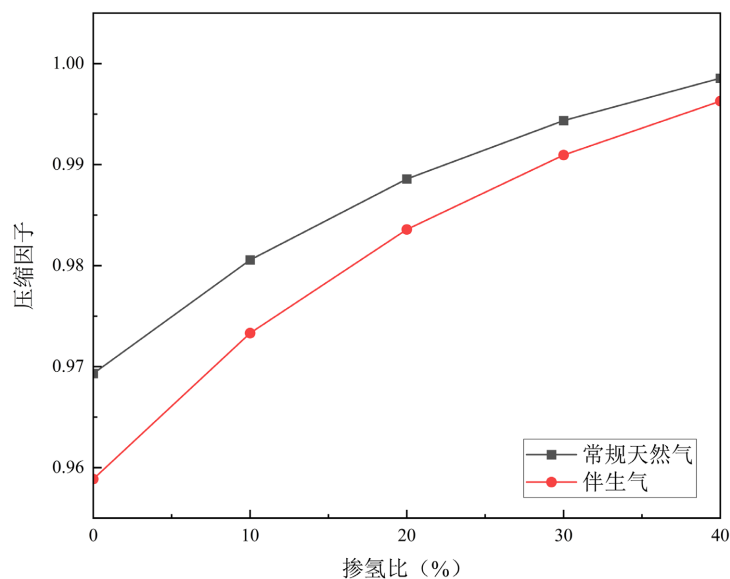
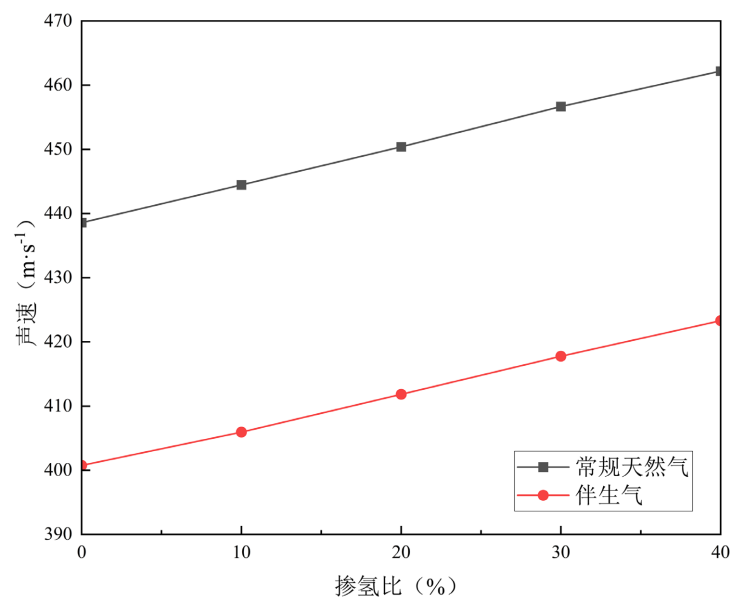


Figure 5. Higher heating value variation curve of hydrogen-enriched natural gas
图 5. 掺氢天然气高位发热量变化曲线

Table 2. Scope of application for compressibility factor calculation methods**表 2.** 压缩因子计算方法适应范围

状态方程	气体类别	温度/℃	压力/MPa	H ₂ /%
AGA8-92DC	管输气	-10.15~64.85	0~12	0~10
	扩展管输气	-48.15~76.85	0~65	0~10
GERG-2008	管输气	183.15~176.85	0~35	0~10
	扩展管输气	213.15~426.85	0~70	0~40

**Figure 6.** Variation in compressibility factor of hydrogen-enriched natural gas**图 6.** 掺氢天然气压缩因子变化曲线**Figure 7.** Variation in speed of sound of hydrogen-enriched natural gas**图 7.** 掺氢天然气声速变化曲线

2.4. 天然气掺氢对粘度的影响

天然气运动粘度是影响天然气管道输送沿程阻力核算的关键物性参数,也是标准孔板流量计等计量设备进行体积流量精准修正的重要基础参数。天然气运动粘度通常通过动力粘度与密度的比值推导得出,其核心计算依据可参考 2022 年发布的 ISO20765-5:2022 (该标准虽主要规定天然气动力粘度计算方法,但结合气体密度数据可进一步换算得到运动粘度),依据此可计算得到掺氢天然气运动粘度随掺氢浓度变化的具体规律。

掺氢使混合气平均分子量显著下降、密度 ρ 大幅降低,因此 $\nu = \mu/\rho$ 总体增大。如图 8 所示,随掺氢比的不断上升,天然气运动粘度逐渐增大。

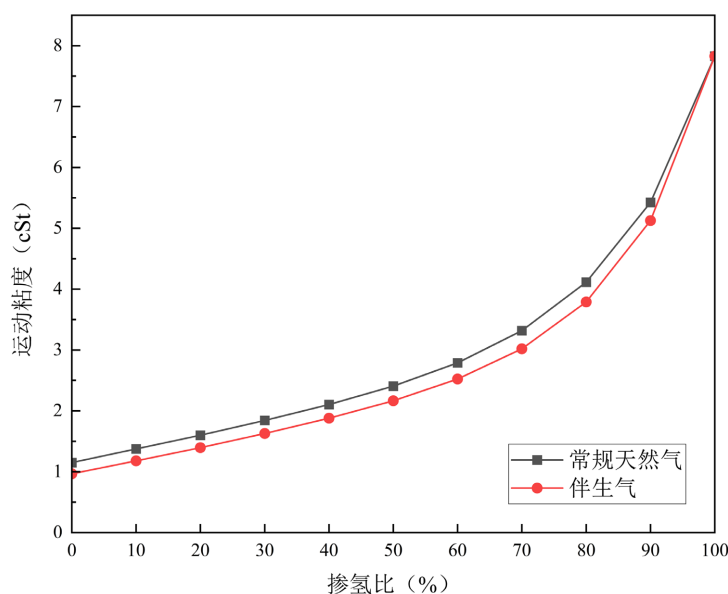


Figure 8. Variation in viscosity of hydrogen-enriched natural gas
图 8. 掺氢天然气粘度变化曲线

3. 天然气掺氢对计量设备的影响

天然气掺氢会对计量设备产生多方面影响,不同类型的计量设备受影响程度也有所不同。

3.1. 孔板流量计

孔板流量计的物理原理决定了其对雷诺数具有明确的纯依赖性,并不区分不同的流体,仅需通过膨胀数 ε 对可压缩流体进行修正。在掺氢比例 $\leq 10\%$ 范围内,孔板流量计能较好地维持规定的计量性能,可参照 GB/T21446 附录 B 的要求对掺氢天然气进行相应参数的计算。

3.2. 超声波流量计

氢气掺入可能需要超声换能器在工作频率、时间分辨率、声学方向性、声耦合与解耦等方面针对掺氢天然气进行调整。掺氢天然气在经过扰流件后产生的非对称速度分布和涡流现象更为显著,这会影响超声流量计的测量准确性。对于超声流量计,前直管段宜适当加长,但具体设置为多少倍管径 D 时可确保入口速度分布达到要求有待后续的实流测试验证。不过在掺氢比例 $\leq 10\%$ 时,大多数超声流量计能维持较好的计量性能。

3.3. 涡轮流量计

涡轮流量计对雷诺数具有依赖性,其测量性能会受到掺氢天然气的影响。相关项目测试表明,在掺氢比例 $\leq 10\%$ 范围内,涡轮流量计能维持一定的计量性能,但随着掺氢比例的增加,其测量误差可能会增大。

3.4. 科里奥利质量流量计

科里奥利质量流量计对被测介质的组分变化较为敏感,氢气的掺入会改变气体的密度和粘度等性质,从而可能影响其测量准确性。不过在一定的掺氢比例范围内,如 $\leq 10\%$,通过适当的校准和补偿,科里奥利质量流量计仍可保持较好的计量性能。由于氢气的热导率与天然气差异较大,掺氢后天然气热导率发生显著变化,热式流量计受到的影响较大,需要根据工况进行复杂的热导系数修正,所以一般不推荐用于掺氢天然气的计量。

4. 结论

1) 在 15°C , 1.3 MPa 的条件下,天然气掺氢对常规天然气与伴生气的物性参数的影响显著。与不掺氢天然气相比,掺氢比 40% 的管输常规天然气的相对密度、沃泊指数、高位发热量分别下降 51% 、 10% 和 42% 左右;压缩因子、声速、运动粘度分别上升 4% 、 5% 和 665% 。在输送安全性能能够得到保证的前提下,建议综合考虑各参数对输送能量和增压能耗等各方面影响,合理确定天然气掺氢浓度,保证掺氢天然气储运使用环节的技术经济性。

2) 现行天然气流量计标准适用的氢气浓度较低,对掺氢天然气的准确计量有一定限制。目前多数天然气流量计标准规定的适用天然气相对密度为 $0.55\sim 0.80$,对应的最高掺氢比约为 10% (部分标准仅为 3%)。需通过针对性实验验证此类标准是否适用于相对密度更低的掺氢天然气计量场景,以保障计量准确性,并在此基础上进一步完善相关方法标准。

基金项目

重庆科技大学 2024 年硕士研究生创新计划项目-YKJCX2420125。

参考文献

- [1] 谢萍,伍奕,李长俊,等. 混氢天然气管道输送技术研究进展[J]. 油气储运, 2021, 40(4): 361-370.
- [2] 贾文龙,温川贤,李金凤,等. 在役空冷器换热性能对掺氢天然气的适应性评估[J]. 油气储运, 2023, 42(2): 161-168+205.
- [3] 焦寰宇. 天然气中掺氢对计量物性参数的影响分析[J]. 石油石化节能与计量, 2024, 14(7): 91-96.
- [4] 刘权,徐红果,刘书文. 天然气掺氢对站场放空系统的影响规律分析[J]. 石油工程建设, 2024, 50(1): 50-53.
- [5] 赵昊,楼国锋,刘少鹏. 掺氢对天然气燃烧室燃烧及排放特性影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(1): 223-229.
- [6] 李玉星,周慧,朱建鲁,等. 纯氢/掺氢天然气管道的减压与调压[J]. 油气储运, 2024, 43(1): 21-31.
- [7] 彭善碧,罗雪,杨林. 掺氢天然气长输管道泄漏扩散规律数值模拟[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(6): 44-52+59.
- [8] 张立业,邓海涛,孙桂军,等. 天然气随动掺氢技术研究进展[J]. 力学与实践, 2022, 44(4): 755-766.
- [9] 张佩颖,罗勤,周理,等. 国内天然气分析测试标准掺氢适应性探讨[J]. 石油与天然气化工, 2023, 52(3): 103-106+117.
- [10] 周宇. 二甲醚掺混低发热量煤层气混合气体的互换性研究[J]. 石油与天然气化工, 2021, 50(1): 58-65.
- [11] 王国云,李长俊,贾文龙,等. GERG-2008 状态方程对超高压天然气流量测量的敏感性[J]. 化学工程, 2022, 50(10): 36-40+78.
- [12] 王国云,李长俊,贾文龙. 基于 GERG-2008 方程对 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 混合物压缩因子的计算与因素分析[J]. 天然气化工 (C1 化学与化工), 2022, 47(2): 89-94.