

引文: 李敬法, 宇波, 李璐伶, 等. 天然气管道随动流量掺氢实验及新认识[J]. 天然气工业, 2024, 44(7): 165-173.
LI Jingfa, YU Bo, LI Luling, et al. An experimental study on servo-flow hydrogen blending in natural gas pipelines: New understandings[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(7): 165-173.

天然气管道随动流量掺氢实验及新认识

李敬法¹ 宇波² 李璐伶³ 段鹏飞³ 刘翠伟⁴ 李玉星⁴

1. 北京石油化工学院机械工程学院 2. 长江大学石油工程学院
3. 深圳燃气集团股份有限公司 4. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院

摘要: 如何获得高掺混均匀度和精度的掺氢天然气是天然气管道掺氢输送的核心问题之一。虽然目前常采用随动流量掺氢工艺, 但国内外尚未见公开报道的实验数据, 氢气和天然气的掺混均匀度和掺混精度得不到实验验证, 在一定程度上制约了掺氢天然气管道输送技术的进一步发展。为此, 研究了天然气管道随动流量掺氢工艺, 并基于高效静态混合器、氢组分浓度三维在线检测和双反馈随动流量定比掺氢, 搭建了天然气管道随动流量掺氢实验系统, 最后开展了掺氢流量 100 Nm³/h 以内、掺氢比 5.0% ~ 20.0% 的实验研究。研究结果表明: ①设计搭建的随动流量掺氢实验系统的掺混均匀度大于 95%, 不考虑测量误差影响时掺氢精度绝对值小于等于 1.67%, 考虑测量误差影响时, 当掺氢比大于等于 10.0% 时掺氢精度绝对值小于等于 3.30%, 而掺氢比为 20.0% 时掺氢精度绝对值小于等于 1.70%, 随动流量掺氢性能优于标准规范技术指标; ②相同实验条件下, 受氢气分析仪精度等级和量程的影响, 掺氢比越小, 掺氢精度越低; ③为合理表征掺氢精度, 在制定相关标准规范时建议根据掺氢比范围分级定义随动流量掺氢精度。结论认为, 该成果认识可为掺氢天然气管道输送技术的发展和标准规范的制定提供重要理论和技术参考。

关键词: 掺氢天然气; 管道输送; 掺氢工艺; 掺混均匀度; 掺氢精度; 随动流量; 静态混合器; 实验研究

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3787/j.issn.1000-0976.2024.07.014

An experimental study on servo-flow hydrogen blending in natural gas pipelines: New understandings

LI Jingfa¹, YU Bo², LI Luling³, DUAN Pengfei³, LIU Cuiwei⁴, LI Yuxing⁴

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China; 2. School of Petroleum Engineering, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 3. Shenzhen Gas Corporation Ltd., Shenzhen, Guangdong 518049, China; 4. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum - East China, Qingdao, Shandong 266580, China)

Natural Gas Industry, Vol.44, No.7, p.165-173, 7/25/2024. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: How to obtain hydrogen-blended natural gas (HBNG) with high mixing uniformity and accuracy is one of the core issues in HBNG pipeline transportation. The servo-flow hydrogen blending process is commonly used now; however, there is no publicly reported experimental data on servo-flow hydrogen blending in natural gas pipelines. The mixing uniformity and accuracy of hydrogen and natural gas cannot be experimentally verified, which restricts to some extent the development of HBNG pipeline transportation technology. This paper discusses the servo-flow hydrogen blending in natural gas pipelines. Based on an efficient static mixer, three-dimensional online detection of hydrogen component concentration, and bi-feedback servo-flow hydrogen blending with constant hydrogen blending ratio (HBR), an experimental system for servo-flow hydrogen blending in natural gas pipelines is built, and then used at the hydrogen blending flow rate below 100 Nm³/h and the HBR of 5.0%–20.0%. The results show that the mixing uniformity of HBNG obtained by the experimental system for servo-flow hydrogen blending in natural gas pipelines is greater than 95%. If the measurement error is ignored, the absolute blending accuracy is $\leq 1.67\%$; if the measurement error is considered, the absolute blending accuracy is $\leq 3.30\%$ when the HBR is $\geq 10.0\%$, and $\leq 1.70\%$ when the HBR is 20.0%. The servo-flow hydrogen blending performance overrides the technical indicators in applicable standards and specifications. Under the same experimental conditions, affected by the accuracy level and measurement range of the hydrogen gas analyzer, the smaller the HBR, the lower the blending accuracy. To reasonably characterize the hydrogen blending accuracy, it is recommended to define the servo-flow hydrogen blending accuracy based on the range of HBR when formulating relevant standards and specifications. The research findings provide important theoretical and technical references for the development of HBNG pipeline transportation technology and the formulation of relevant standards and specifications.

Keywords: Hydrogen-blended natural gas; Pipeline transportation; Hydrogen blending process; Mixing uniformity; Blending accuracy; Servo-flow; Static mixer; Experimental study

基金项目: 国家重点研发计划“氢能技术”重点专项“中低压纯氢与掺氢燃气管输工艺与掺氢设备研发”(编号: 2021YFB4001602)、国家自然科学基金项目“城镇掺氢燃气管道掺混/分层传质机理及高精度随动流量掺氢调控机制研究”(编号: 52372311)、福建省“揭榜挂帅”引导性项目“城镇中低压管道燃气掺氢及燃烧关键技术与装备研发”(编号: 2023H0054)。

作者简介: 李敬法, 1990年生, 副研究员, 博士, 本刊青年编委; 主要从事氢能管道输送技术的研究工作。地址: (102617) 北京市大兴区清源北路19号。ORCID: 0000-0002-5207-1156。E-mail: lijingfa@bupt.edu.cn

通信作者: 宇波, 1972年生, 教授, 博士研究生导师, 博士; 主要从事氢能/油气储运技术、新能源综合利用技术方面的研究工作。地址: (430100) 湖北省武汉市蔡甸区蔡甸街大学路111号。ORCID: 0000-0002-4231-6914。E-mail: yubobox@vip.163.com

0 引言

将氢气掺入现役天然气管道中与天然气混合输送,被认为是氢能高效经济输送的重要方式,已成为氢能输送领域的研究热点^[1-16]。氢气与天然气的理化性质差异显著,为了保证掺氢管道输送系统的安全性和掺氢天然气终端利用的稳定性,在进行掺氢输送时首先需要将氢气和天然气掺混均匀,并按给定的掺氢比例精确控制掺入天然气中氢气的量^[17-25]。因此,如何获得高掺混均匀度和精度的掺氢天然气是天然气管道掺氢输送的核心问题之一。目前,团体标准《天然气掺氢混气站技术规程》征求意见稿中明确规定了氢气与天然气的掺混均匀度不应低于95%,由于掺氢精度受多个因素共同影响,目前标准规范中并无明确要求,只给出了对测量仪表精度等级的要求。

向天然气管道中掺混氢气的方式主要有两种:①无任何辅助设备,直接向天然气管道内注入氢气,例如通过在天然气管道上设置T型注氢管道^[26-34];②利用辅助混气设备将天然气与氢气充分混合后再注入天然气管道^[35-38]。对于无任何辅助设备的混气方式,需要一定的管道长度才可能将氢气和天然气掺混均匀,该段管道在掺混过程中会存在氢浓度局部富集,长期运行可能会对管道系统造成损伤,而且在停输等极端工况下,该种混气方式的掺混均匀度无法得到保证。对于利用混气设备进行辅助混气的方式,目前国内外已发展多种气体掺混工艺,例如高压比例掺混、文丘里引射式掺混和随动流量掺混等,不同掺混工艺的工作原理、掺混流程、工艺特点和适用范围不同^[39,40]。在掺氢天然气管道输送技术中,

为了满足流量波动范围大、掺混精度要求高的要求,目前多采用随动流量掺氢工艺。但受限于掺氢天然气管道输送技术发展不成熟、掺氢示范项目数量少和技术保密等诸多因素,目前尚未见公开报道的随动流量掺氢实验数据,氢气和天然气的掺混均匀度和掺混精度得不到公开的实验验证,在一定程度上制约了掺氢天然气管道输送技术的发展和进一步推广。

为了弥补当前研究的不足,从技术层面上推动掺氢天然气管道输送技术的发展和进一步推广,本文深入研究了天然气管道随动流量掺氢工艺,基于自研技术搭建了天然气管道随动流量掺氢实验系统,开展了掺氢流量100 Nm³/h以内、掺氢比5%~20%的实验研究,可为掺氢天然气管道输送技术的发展和标准规范的制定提供重要参考。

1 天然气管道随动流量掺氢原理

天然气管道随动流量掺氢主要由混气系统和PLC控制系统共同完成,其中混气系统包括天然气管路、氢气管路、静态混合器、混合气管路,基本原理是以天然气为主动气源,以氢气为随动气源,在静态混合器中将氢气和天然气按照设定的比例进行掺混,并将天然气流量、氢气流量和混合气管路中气体组分浓度和热值信号等掺混数据传输到PLC控制系统,然后通过控制随动气源管路上流量调节阀的开度来实时响应主动气源流量变化,使得随动气源流量按预先设定的掺混比例跟随主动气源流量的变化而变化,从而依据固定的比例在天然气中掺混氢气,并实时对氢气掺混状态进行监控、动态调节、联锁报警和切断等(图1)。

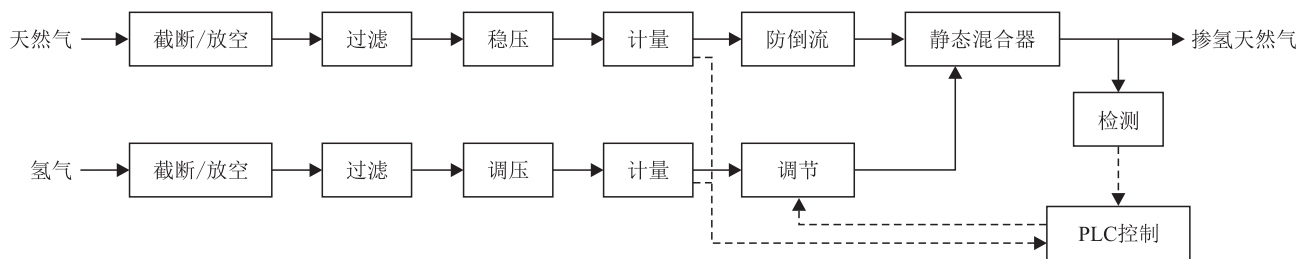


图1 随动流量掺氢原理示意图

1) 天然气管路:该气路的主要功能是为随动流量掺氢系统中静态混合器提供稳定且符合要求的天然气气流。该气路由切断/放空、过滤、稳压、计量、防倒流等单元组成,可实现压力、温度、流量等信号的现场实时显示和远程传输。为保证掺氢安全,标准

中规定天然气管路内气体流速不宜超过20 m/s。为了保证连续运行,天然气管路可设置工作路和备用路,一备一用。

2) 氢气管路:该气路的主要功能是为随动流量掺氢系统中静态混合器提供稳定且符合要求的氢气

气流。该气路由切断/放空、过滤、调压、计量、流量调节等单元组成,可实现压力、温度、流量等信号的现场实时显示和远程传输。为保证掺氢安全,标准中规定氢气管路内气体流速不宜超过 10 m/s 。为了保证连续运行,和天然气管路类似,氢气管路可设置工作路和备用路,一备一用。值得指出的是,为了顺利将氢气掺入到静态混合器中,该气路压力需维持比天然气管路压力高 $0.1 \sim 0.2\text{ MPa}$ 。

3) 静态混合器:静态混合器是随动流量掺氢系统中氢气和天然气进行充分掺混的主要场所,内部结构一般由导流单元、扰流单元组成,且一般还配有差压表和排污阀等。当氢气和天然气进入静态混合器后,在导流单元的引导下天然气和氢气进行初步掺混,然后经过扰流单元,氢气和天然气进行充分掺混。差压表主要用于指示静态混合器的压降,以检查静态混合器内部是否堵塞和是否需要排污。排污阀主要是用于定期排污。静态混合器的掺混效果主要取决于扰流单元,标准规范中要求氢气和天然气的掺混均匀度不应低于 95% 。

4) 混合气管路:掺氢天然气混合气体从静态混合器出口排出后进入混合气管路,该气路的主要功能是进行掺混均匀度和掺氢精度的检测,并将掺氢天然气输送到下游管路。气体组分分析仪/热值仪一般设置在静态混合器出口下游 $1 \sim 2\text{ m}$ 处,在混合气管路上对掺氢天然气中氢组分浓度或混合气体热值进行检测,验证掺氢天然气是否达到规定的掺混均匀度和掺氢精度,并向 PLC 控制系统反馈检测信号。但值得指出的是,目前绝大多数随动流量掺氢工艺并未将混合气管路上的检测信号考虑到掺氢精度调节中,仅依据天然气和氢气流量信号进行掺氢精度调节,只有当掺氢精度要求较高时,才会利用混合气管路上气体组分分析仪/热值仪检测信号。为保证掺氢安全,标准规定混合气管路内气体流速不宜超过 10 m/s 。

5) PLC 控制系统:PLC 控制系统的主要功能是接收气体管路上流量和组分浓度、热值等信号,按设定的程序进行计算并输出氢气流量调节阀的调节信号,完成对氢气流量的粗调或精调,使掺氢天然气达到规定的掺氢比和掺氢精度。其中,粗调是指根据天然气管路的流量和掺氢比,初步确定氢气管路的流量和调节阀开度,对实际掺氢比进行修正。精调是指待随动流量掺氢系统稳定运行后,根据组分浓度信号或热值信号,按照设定的程序计算,输出流量调节信号到氢气流量调节阀,对氢气流量进行精细调节,以满足更高的掺氢精度需求。目前绝大

多数随动流量掺氢工艺对掺氢精度的调节只有粗调。此外,值得指出的是,组分分析仪/热值仪的取样和响应时间、流量调节阀的响应时间、信号传输时间、流量和压力的波动幅度等因素均会对掺氢精度的调节产生影响。

上述随动流量掺氢过程涉及的工艺计算主要包括流量计算、信号反馈、信号传输、指挥调节、比例修正。此外,上述气体管路应设置气体泄漏报警器,且管路和仪表设备间的密封及连接应符合标准规范要求。

2 天然气管道随动流量掺氢实验系统

2.1 实验系统

为了从实验角度验证随动流量掺氢工艺的掺氢性能,基于上述掺氢原理,本文设计搭建了天然气管道随动流量掺氢实验系统,实物图和工艺流程示意图分别如图 2 和图 3 所示。该随动流量掺氢实验系统适应的掺氢比范围为 $0 \sim 20\%$,流量范围为 $0 \sim 100\text{ Nm}^3/\text{h}$ 。其中,天然气管路的设计流量为 $80\text{ Nm}^3/\text{h}$,管径为 DN25,入口压力为 4 MPa ;氢气管路的设计流量为 $20\text{ Nm}^3/\text{h}$,管径为 DN15,入口压力为 5 MPa ,经调压后入口压力为 4.15 MPa 。氢气和天然气经过静态混合器进行充分掺混后,进入混合气管路,管径为 DN25,然后通过氢组分浓度三维测量管段后再进入下游管道,该测量管段管径为 DN100,压力为 4 MPa 。在掺混的过程中,各管路流量和氢组分浓度信号会上传到 PLC 控制系统进行集中管控。该随动流量掺氢实验系统的主要参数如表 1 所示。

为了获得高掺混均匀度、高掺氢精度的掺氢天然气混合气体,本文对搭建的天然气管道随动流量掺氢实验系统进行了精心设计,主要特色说明如下。



图2 天然气管道随动流量掺氢实验系统实物图

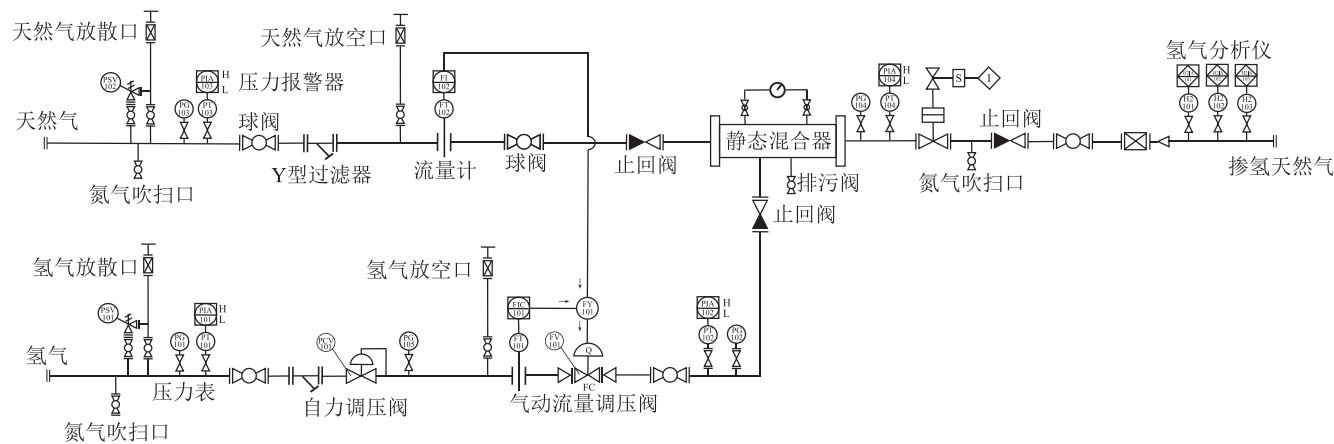


图 3 天然气管道随动流量掺氢实验系统工艺流程示意图

表 1 天然气管道随动流量掺氢实验系统主要参数表

参数名称	天然气入口	氢气入口	氢气调压器后	氢气调节阀后	静态混合器出口	仪表风
工作压力 /MPa	4.0	5.0	4.2	4.15	4.0	0.5 ~ 0.7
设计压力 /MPa	4.5	5.5	5.5	5.5	5.5	1.0
操作温度	常温	常温	常温	常温	常温	常温
设计温度 /℃	50	50	50	50	50	50
流量 /(Nm ³ · h ⁻¹)	80	—	20	—	100	6

1) 高效静态混合器。静态混合器是随动流量掺氢系统中氢气和天然气进行混合的主要场所,其内部的扰流单元结构对氢气和天然气的掺混均匀度具有重要影响。笔者对常见的 KSM (Kenics Static Mixer) 型、SMX (Static Mixer Using X Design) 型和 LPD (Low Pressure Drop) 型、SV (Static Mixer Using V Design) 型静态混合器的掺混效果进行了仿真研究^[21]。经过比选确定了采用 SV 型静态混合器,几何模型示意图如图 4 所示。为了提高掺混效果,静态混合器内部采用两级扰流单元,填料选择厚度为 0.2 mm 的波纹板,相邻填料波纹方向相互垂直,静态混合器入口导流单元选择垂直入射方式,并在导流单元出口四周设计多个氢气入射孔。



图 4 静态混合器几何结构示意图

2) 氢组分浓度三维在线检测。目前常见的随动流量掺氢工艺一般只在混合气管路上设置一台氢气分析仪,只能实现对氢组分浓度的单点检测和对混

合气管路中某一局部位置处的掺氢比进行验证,无法真正得到氢气和天然气的掺混均匀度和掺氢精度。为了合理表征掺混均匀度和掺氢精度,本文发展了氢组分浓度三维在线检测方法,研究了在线式氢气分析仪在混合气管路上的布点方式。如图 5 所示,在混合气管路一定距离处(静态混合器出口下游 1 000 mm)设计了可独立安装的氢组分浓度三维在线检测管段。为了在不同管道截面的不同深度位置实现氢组分浓度的有效检测,减小混合气管路管径较小的影响,该三维在线检测管段采用了大管径的管路(DN100)。图 5 中在 3 个不同管道截面(间距 180 mm)的不同深度位置,即管道轴心(距管道顶部 50 mm)、高于管道轴心(距管道顶部 25 mm)、低于管道轴心(距管道顶部 75 mm)3 个典型深度位置处,安装了 3 台氢气分析仪的取样口,实现氢组分浓度的三维在线检测。氢组分浓度三维在线检测既可以采用测得的

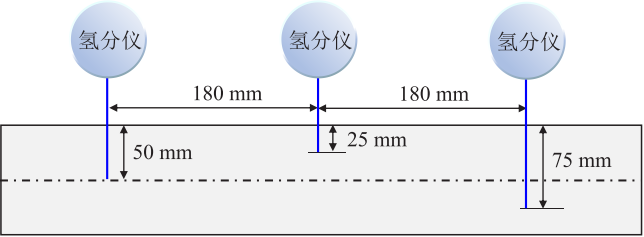


图 5 氢组分浓度三维在线检测管段示意图

氢组分浓度对掺混均匀度进行量化表征,还可以计算随动流量掺氢精度,从而更加真实反映氢气和天然气的掺混情况。

3) 双反馈随动流量定比掺氢。掺氢精度的控制是随动流量掺氢工艺的核心指标,随动流量掺氢精度控制的难点在于主动气源(天然气)的流量会随时间和下游用气量需求发生变化,要求随动气源(氢气)的流量保持固定的掺混比例跟随主动气源同步变化,而传统随动流量掺氢工艺仅依据天然气和氢气管路流量进行定比调节单反馈控制或辅之混合气管路上单点氢组分浓度/热值反馈调节,掺氢精度难以精准调控,不能满足高精度掺氢的要求。为此,本文提出以天然气和氢气管路流量为“粗调反馈”、以混合气管路上氢组分浓度三维在线检测值为“精调反馈”,发展先通过流量比例调节进行粗调、再通过混合气管路上氢组分浓度三维在线检测值进行精调,从而达到掺氢比例精确控制的“粗调+精调”双反馈随动流量定比高精度掺氢技术,该技术的原理如图 6 所示。

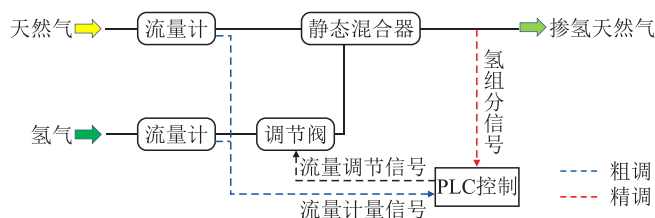


图 6 双反馈随动流量定比掺氢原理图

2.2 实验流程和注意事项

1) 实验准备。在实验气源方面,天然气应符合《天然气:GB 17820—2018》的技术指标要求,氢气应符合《氢气第 2 部分:纯氢、高纯氢和超纯氢 GB/T 3634.2—2011》的技术指标要求,本实验中天然气气源来自西气东输二线的管道气,氢气由高压氢气瓶组提供。在实验电气方面,实验现场应确保可以提供 220 V、50 Hz 的电源。在消防准备和安防防控方面,实验现场应配有消火栓、灭火器等消防器具,并注意通风、严禁烟火。

2) 实验步骤。①确认天然气管路和氢气管路进口阀门、混合气管路出口阀门和排空置换阀门处于关闭状态,其他阀门处于打开状态,采用氮气对实验系统进行吹扫置换;②打开天然气管路和氢气管路的进口阀门,使天然气管路、氢气管路的进口压力达到掺混要求,当天然气进入实验系统时同时开启氢气管路调节阀,使氢气进入实验系统,调整 PID

参数,开始掺混;③观察混合气管路上氢气分析仪显示的掺氢比达到设定的掺氢比要求时,将实验系统投入自动运行状态,进入正常掺混状态;④通过改变设定的掺氢比和调节天然气管路流量,测试天然气管道随动流量掺氢的性能,记录天然气流量、氢气流量和 3 台氢气分析仪数据;⑤完成实验测试后,先关闭天然气管路、氢气管路的进口阀门和混合气管路的出口阀门,排净实验系统内残留气体,再关闭其他阀门。

3) 注意事项。①为保证实验安全,各气路的紧急切断阀应与 PLC 控制系统联锁,当出现掺氢浓度超过设定值界限或遇紧急情况时,可及时切断气体进出口阀门,避免不合格的掺氢天然气输送到下游;②实验应在通风条件较好的场地进行,实验前应对实验系统进行氮气吹扫置换,实验场地需符合消防和防爆要求;③影响掺氢精度的主要因素有天然气和氢气的流量计、氢气流量调节阀、氢气分析仪的精度等级,氢气分析仪的取样管长度,PLC 控制系统与流量计、氢气分析仪、氢气流量调节阀的通讯时间,因此应注意仪表的选型和安装。

3 实验结果分析与讨论

在天然气管道随动流量掺氢实验中,分别进行了掺氢比(体积分数)为 5%、10%、15%、20% 的实验研究。实验过程中,在设定的掺氢比下,通过改变天然气管路的流量模拟工程实际中天然气流量的波动,以验证随动流量掺氢获得高掺混均匀度和高掺氢精度掺氢天然气的的能力。因此,实验过程中分别记录了天然气流量数据、氢气流量数据和 3 台氢气分析仪测得的氢组分浓度数据,如表 2 所示。

基于表 2 中的实验数据,可以计算得到氢气和天然气的掺混均匀度和掺氢精度。首先为了计算氢气和天然气的掺混均匀度,假设 3 台氢气分析仪测得的氢组分浓度分别为 c_1 、 c_2 、 c_3 ,此时掺混均匀度的计算如下^[14,21]:

$$\sigma = \left[1 - \frac{1}{\bar{c}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^3 (c_i - \bar{c})^2}{2}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

其中

$$\bar{c} = (c_1 + c_2 + c_3) / 3$$

式中 σ 表示氢气和天然气的掺混均匀度; c_i 表示 3 台氢气分析仪测得的氢组分浓度; $\bar{c}$ 表示氢组分平均浓度。

表 2 不同掺氢比下的实验数据表

实验序号	设定掺氢比	天然气流量 /(Nm ³ · h ⁻¹)	氢气流量 /(Nm ³ · h ⁻¹)	氢组分浓度		
				氢分仪 1	氢分仪 2	氢分仪 3
1	5.0%	52.97	2.71	4.91%	5.02%	4.83%
2		73.89	3.60	4.90%	5.24%	5.06%
3		81.01	4.29	4.98%	4.91%	5.07%
4		93.46	4.72	5.00%	4.85%	4.90%
5	10.0%	52.95	5.92	9.84%	10.23%	9.94%
6		71.68	7.88	10.00%	9.87%	10.14%
7		76.15	8.47	10.01%	9.89%	10.12%
8		86.63	9.37	9.95%	9.98%	9.98%
9	15.0%	51.06	8.98	14.85%	14.97%	15.02%
10		65.67	11.66	14.94%	15.06%	15.08%
11		72.79	13.68	14.82%	15.04%	15.09%
12		78.91	13.68	14.88%	15.00%	15.10%
13	20.0%	45.42	11.75	20.09%	19.91%	20.00%
14		50.49	12.48	20.07%	19.97%	19.93%
15		60.05	14.95	19.90%	20.00%	19.98%
16		65.67	16.75	19.83%	20.13%	20.04%

假设实验时设定的掺氢比为 K ，随动流量掺氢精度表示氢组分平均浓度相对于设定掺氢比的相对误差，则随动流量掺氢精度的计算如下：

$$\eta = \frac{\bar{c} - K}{K} \times 100\% \tag{2}$$

式中 η 表示随动流量掺氢精度； K 表示设定的掺氢比。

由于测量仪表存在固有的测量误差，因此会使实验数据存在误差。为保证实验数据的可靠准确，需对测量仪表的测量精度进行不确定度分析。精度等级越高表示测量精度越高，数据更加可靠。式（1）和式（2）在计算氢气和天然气掺混均匀度和随动流量掺氢精度时主要用到氢气分析仪测量氢组分浓度，本实验所用氢气分析仪的量程为 0 ~ 30%，精度等级为 1（最大固有测量误差 0.3%）。根据式（1）和式（2），对表 2 中的实验数据进行计算，考虑氢气分析仪的量程和精度等级，可得到本文实验系统中氢气和天然气的掺混均匀度和随动流量掺氢精度，如表 3 所示。需要说明的是，掺混均匀度的计算主要与氢组分浓度均方差有关，在计算时测量误差的影响可以相互抵消，因此这里可以不考虑测量误差的影响。

表 3 数据表明，在本实验研究的掺氢比和掺氢流量下，设计搭建的天然气管道随动流量掺氢实验

表 3 不同掺氢比下的掺混均匀度和掺氢精度表

实验序号	设定掺氢比	平均氢浓度	掺混均匀度	掺氢精度 (计算值 ± 误差)
1	5.0%	4.920%	98.06%	−1.60% ± 6.00%
2		5.067%	96.64%	1.33% ± 6.00%
3		4.987%	98.39%	−0.27% ± 6.00%
4		4.917%	98.45%	−1.67% ± 6.00%
5	10.0%	10.003%	97.98%	0.03% ± 3.00%
6		10.003%	98.65%	0.03% ± 3.00%
7		10.007%	98.85%	0.07% ± 3.00%
8		9.970%	99.83%	−0.30% ± 3.00%
9	15.0%	14.947%	99.42%	−0.36% ± 2.00%
10		15.027%	99.50%	0.18% ± 2.00%
11		14.983%	99.04%	−0.11% ± 2.00%
12		14.993%	99.27%	−0.04% ± 2.00%
13	20.0%	20.000%	99.55%	0 ± 1.50%
14		19.990%	99.64%	−0.05% ± 1.50%
15		19.960%	99.73%	−0.20% ± 1.50%
16		20.000%	99.23%	0 ± 1.50%

系统得到的掺氢天然气的掺混均匀度远高于95%,符合团体标准《天然气掺氢混气站技术规程》征求意见稿的要求。此外,在掺氢比5%~20%范围内,本文实验系统具有较高的随动流量掺氢精度。当不考虑测量误差影响时,掺氢精度绝对值小于等于1.67%;当考虑测量误差影响时,当掺氢比为5%时掺氢精度绝对值小于等于7.67%,掺氢比为10%时掺氢精度小于等于3.30%,掺氢比为15%时掺氢精度绝对值小于等于2.36%,而掺氢比为20%时掺氢精度绝对值小于等于1.70%。随着掺氢比的增加,随动流量掺氢精度逐渐提高,造成这种现象的原因是随着掺氢比的增加,氢组分浓度值越来越接近氢气分析仪的量程,根据氢气分析仪的精度等级可知,测量误差相对变小。综上,在相同实验条件下,受氢气分析仪精度等级和量程的影响,掺氢比越小,所得的随动流量掺氢精度越低。因此,为了更合理的表征天然气的掺氢精度,在制定相关标准规范时,应根据掺氢比范围分级定义随动流量掺氢精度。

4 结论

本文针对当前天然气管道随动流量掺氢实验数据缺乏、在一定程度上限制掺氢天然气管道输送技术发展的现状,开展了天然气管道随动流量掺氢实验研究,主要结论如下:

1) 基于随动流量掺氢原理,设计搭建了一套天然气管道随动流量掺氢实验系统,该实验系统采用了高效静态混合器、氢组分浓度三维在线检测和双反馈随动流量定比掺氢技术,以期获得高掺混均匀度、高掺氢精度的掺氢天然气混合气体,满足掺氢天然气管道输送对掺氢天然气混合气体的要求。

2) 进行了掺氢流量 $100\text{ Nm}^3/\text{h}$ 以内、掺氢比5.0%~20.0%的实验研究,结果表明本研究设计搭建的随动流量掺氢实验系统得到的掺氢天然气的掺混均匀度大于95%,不考虑测量误差影响时掺氢精度绝对值小于等于1.67%,考虑测量误差影响时,当掺氢比大于等于10.0%时掺氢精度绝对值小于等于3.30%,而掺氢比为20.0%时掺氢精度绝对值小于等于1.70%,掺氢性能优于标准规范的技术指标。

3) 相同实验条件下,受氢气分析仪精度等级和量程的影响,掺氢比越小,掺氢精度越低。因此,为合理表征掺氢精度,在制定相关标准规范时建议根据掺氢比范围分级定义随动流量掺氢精度。

参 考 文 献

- [1] 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.
LI Jingfa, SU Yue, ZHANG Heng, et al. Research progresses on pipeline transportation of hydrogen-blended natural gas[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 137-152.
- [2] 李敬法,李建立,王玉生,等. 氢能储运关键技术研究进展及发展趋势探讨[J]. 油气储运, 2023, 42(8): 856-871.
LI Jingfa, LI Jianli, WANG Yusheng, et al. Research progress and development trends of key technologies for hydrogen energy storage and transportation[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(8): 856-871.
- [3] 高岳,朱红钧,唐堂,等. 天然气管道掺氢输送研究现状与分析[J]. 低碳化学与化工, 2024, 49(3): 118-128.
GAO Yue, ZHU Hongjun, TANG Tang, et al. Research status and analysis of hydrogen-blended natural gas transportation in natural gas pipelines[J]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering, 2024, 49(3): 118-128.
- [4] 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.
XIE Ping, WU Yi, LI Changjun, et al. Research progress on pipeline transportation technology of hydrogen-mixed natural gas[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(4): 361-370.
- [5] 王玮,王秋岩,邓海全,等. 天然气管道输送混氢天然气的可行性[J]. 天然气工业, 2020, 40(3): 130-136.
WANG Wei, WANG Qiuyan, DENG Haiquan, et al. Feasibility analysis on the transportation of hydrogen-natural gas mixtures in natural gas pipelines[J]. Natural Gas Industry, 2020, 40(3): 130-136.
- [6] 邱玥,周苏洋,顾伟,等. “碳达峰、碳中和”目标下混氢天然气技术应用前景分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1301-1320. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.211614.
QIU Yue, ZHOU Suyang, GU Wei, et al. Application prospect analysis of hydrogen enriched compressed natural gas technologies under the target of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1301-1320.
- [7] 仲冰,张学秀,张博,等. 我国天然气掺氢产业发展研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 100-107.
ZHONG Bing, ZHANG Xuexiu, ZHANG Bo, et al. Industrial development of hydrogen blending in natural gas pipelines in China[J]. Strategic Study of CAE, 2022, 24(3): 100-107.
- [8] 许晓强,张霞. 碳中和背景下天然气掺氢技术现状及展望[J]. 上海节能, 2023(12): 1773-1776.
XU Xiaoliang, ZHANG Xia. Current status and prospects of natural gas hydrogenation technology under carbon neutrality[J]. Shanghai Energy Conservation, 2023(12): 1773-1776.
- [9] 于子龙,张立业,宁晨,等. 天然气掺氢管道输送及终端应用[J]. 力学与实践, 2022, 44(3): 491-502.

- YU Zilong, ZHANG Liye, NING Chen, et al. Natural gas hydrogen mixing pipeline transportation and terminal application[J]. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(3): 491-502.
- [10] 任若轩, 游双娇, 朱新宇, 等. 天然气掺氢输送技术发展现状及前景[J]. *油气与新能源*, 2021, 33(4): 26-32.
- REN Ruoxuan, YOU Shuangjiao, ZHU Xinyu, et al. Development status and prospects of hydrogen compressed natural gas transportation technology[J]. *Petroleum and New Energy*, 2021, 33(4): 26-32.
- [11] 王洪建, 熊思江, 张晓瑞, 等. 天然气掺氢技术应用现状与分析[J]. *煤气与热力*, 2021, 41(10): 12-15.
- WANG Hongjian, XIONG Sijiang, ZHANG Xiaorui, et al. Application status and analysis of technology for blending hydrogen into natural gas[J]. *Gas & Heat*, 2021, 41(10): 12-15.
- [12] ERDENER B C, SERGI B, GUERRA O J, et al. A review of technical and regulatory limits for hydrogen blending in natural gas pipelines[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(14): 5595-5617.
- [13] ZHANG Chaoyang, SHAO Yanbo, SHEN Wenpeng, et al. Key technologies of pure hydrogen and hydrogen-mixed natural gas pipeline transportation[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(22): 19212-19222.
- [14] MAHAJAN D, TAN Kun, VENKATESH T, et al. Hydrogen blending in gas pipeline networks—A review[J]. *Energies*, 2022, 15(10): 3582.
- [15] CHAE M J, KIM J H, MOON B, et al. The present condition and outlook for hydrogen-natural gas blending technology[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2022, 39(2): 251-262.
- [16] PELLEGRINI M, GUZZINI A, SACCANI C. A preliminary assessment of the potential of low percentage green hydrogen blending in the Italian natural gas network[J]. *Energies*, 2020, 13(21): 5570.
- [17] LI Jingfa, SU Yue, YU Bo, et al. Influences of hydrogen blending on the Joule-Thomson coefficient of natural gas[J]. *ACS Omega*, 2021, 6(26): 16722-16735.
- [18] HUANG Huijie, LI Jingfa, SUN Xu, et al. Influence analysis on the storage capacity of hydrogen-blended natural gas pipeline[J]. *Computational Energy Science*, 2024, 1(1): 3-16.
- [19] ZHANG Bo, XU Ning, ZHANG Haoran, et al. Influence of hydrogen blending on the operation of natural gas pipeline network considering the compressor power optimization[J]. *Applied Energy*, 2024, 358: 122594.
- [20] ZHANG Heng, LI Jingfa, SU Yue, et al. Effects of hydrogen blending on hydraulic and thermal characteristics of natural gas pipeline and pipe network[J]. *Oil & Gas Science and Technology-Revue d' IFP Energies Nouvelles*, 2021, 76: 70.
- [21] 郑度奎, 李敬法, 宇波, 等. 非金属PE管材氢气—甲烷渗透研究进展[J/OL]. *材料导报*: 1-22. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230727.0936.004.html>.
- ZHENG Dukui, LI Jingfa, YU Bo, et al. Research progress on hydrogen-methane permeation in non-metallic PE pipe materials[J/OL]. *Materials Reports*: 1-22. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20230727.0936.004.html>.
- [22] 赵茜, 邢云颖, 王修云, 等. 天然气管道掺氢输送相容性研究现状[J/OL]. *材料导报*: 1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20231024.1756.002.html>.
- ZHAO Qian, XING Yunying, WANG Xiuyun, et al. Research status of compatibility of hydrogen-blended natural gas pipeline[J/OL]. *Materials Review*: 1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20231024.1756.002.html>.
- [23] 张烘玮, 赵杰, 李敬法, 等. 天然气掺氢输送环境下的腐蚀与氢脆研究进展[J]. *天然气工业*, 2023, 43(6): 126-138.
- ZHANG Hongwei, ZHAO Jie, LI Jingfa, et al. Research progress on corrosion and hydrogen embrittlement in hydrogen-natural gas pipeline transportation[J]. *Natural Gas Industry*, 2023, 43(6): 126-138.
- [24] ZHOU Chengshuang, YE Baoguo, SONG Yangyang, et al. Effects of internal hydrogen and surface-absorbed hydrogen on the hydrogen embrittlement of X80 pipeline steel[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(40): 22547-22558.
- [25] ZHAO Yan, 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(23): 12239-12253.
- [26] SU Yue, LI Jingfa, GUO Wangyi, et al. Prediction of mixing uniformity of hydrogen injection in natural gas pipeline based on a deep learning model[J]. *Energies*, 2022, 15(22): 8694.
- [27] YAN Shuangjie, JIA Guanwei, XU Weiqing, et al. Computational fluid dynamic analysis of hydrogen-injected natural gas for mixing and transportation behaviors in pipeline structures[J]. *Energy Science & Engineering*, 2023, 11(8): 2912-2928.
- [28] KHABBAZI A J, ZABIHI M, LI Ri, et al. Mixing hydrogen into natural gas distribution pipeline system through Tee junctions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 49(Part D): 1332-1344.
- [29] 王帅, 杨成功, 周海, 等. T型天然气管道掺氢输送流动特性数值模拟研究[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(4): 1-8.
- WANG Shuai, YANG Chenggong, ZHOU Hai, et al. Numerical simulation study on flow characteristics of hydrogen blending in T-shaped natural gas pipeline[J]. *Journal of Yanan University (Natural Science Edition)*, 2023, 42(4): 1-8.
- [30] 安永伟, 孙晨, 冀守虎, 等. 天然气掺氢在管道流动中的氢浓度分布[J]. *力学与实践*, 2022, 44(4): 767-775.
- AN Yongwei, SUN Chen, JI Shouhu, et al. Hydrogen concentration distribution in flow of hydrogen blended to natural gas in pipeline[J]. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(4): 767-775.

- [31] 朱红钧, 陈俊文, 唐堂, 等. 天然气管道注氢掺混过程数值模拟研究[J]. 天然气与石油, 2023, 41(2): 22-32.
ZHU Hongjun, CHEN Junwen, TANG Tang, et al. Numerical simulation of the process of injecting hydrogen in natural gas pipeline[J]. Natural Gas and Oil, 2023, 41(2): 22-32.
- [32] 许彤, 吴浩志, 陈林, 等. 基于 FLUENT 模拟的储罐掺氢装置掺混过程及掺氢比对管道运行参数影响研究[J]. 力学与实践, 2023, 45(2): 314-324.
XU Tong, WU Haozhi, CHEN Lin, et al. Study of blending process and hydrogen ratio for the hydrogen blending device in the tank on the pipeline operation parameters by FLUENT simulations[J]. Mechanics in Engineering, 2023, 45(2): 314-324.
- [33] 李敬法, 宇波, 苏越, 等. 静置工况条件下掺氢天然气浓度分布规律[J]. 天然气工业, 2024, 44(2): 145-155.
LI Jingfa, YU Bo, SU Yue, et al. Concentration distribution pattern of hydrogen-blended natural gas under static operating conditions[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(2): 145-155.
- [34] LIU Cuiwei, PEI Yebin, CUI Zhaoxue, et al. Study on the stratification of the blended gas in the pipeline with hydrogen into natural gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(13): 5186-5196.
- [35] 苏越, 李敬法, 宇波, 等. 氢气和天然气在静态混合器中的掺混模拟[J]. 天然气工业, 2023, 43(3): 113-122.
SU Yue, LI Jingfa, YU Bo, et al. Simulation study on the mixing of hydrogen and natural gas in static mixers[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(3): 113-122.
- [36] 刘永振, 陈天昊, 赵序海, 等. 基于 SMX 静态混合器的天然气掺氢流动影响研究[J]. 石油化工设备, 2024, 53(2): 1-9.
LIU Yongzhen, CHEN Tianhao, ZHAO Xuhai, et al. Investigation on the influence of natural gas and hydrogen mixing flow based on SMX static mixer[J]. Petro-Chemical Equipment, 2024, 53(2): 1-9.
- [37] 邵艳波, 刘欣, 张志贵, 等. 伴生气掺氢条件下 KSM 型静态混合器参数优化[J/OL]. 中国测试: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20240320.1534.006.html>.
SHAO Yanbo, LIU Xin, ZHANG Zhigui, et al. Parameter optimization of KSM static mixer under the condition of hydrogen mixing with associated gas[J/OL]. China Measurement & Test: 1-11. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1714.TB.20240320.1534.006.html>.
- [38] LIU Qi, LIU Yang, LI Shanji, et al. Analysis of the static mixer effect on natural gas mixing process in a pipeline[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2022, 85: 102146.
- [39] 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): 753-766.
ZHANG Liye, DENG Haitao, SUN Guijun, et al. Research progress of natural gas follow-up hydrogen mixing technology[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(4): 753-766.
- [40] 刘学铭, 陈利琼, 程绍军. PLC 和色谱分析仪在天然气混气中的应用[J]. 油气储运, 2008, 27(6): 55-58.
LIU Xueming, CHEN Liqiong, CHENG Shaojun. Application of PLC and chromatograph in natural gas mixing[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2008, 27(6): 55-58.

(修改回稿日期 2024-05-15 编辑 张 娟)



本文互动