

天然气随动掺氢技术研究进展¹⁾

张立业^{*、2)} 邓海涛^{*} 孙桂军^{*} 宁晨^{*} 孙钢^{*} 刘伟[†] 孙晨[†] 兰雪影[†]
鲁仰辉[†] 贾冠伟^{**} 安永伟^{**} 冀守虎^{**} 许未晴^{††}

^{*}(朝阳燕山湖发电有限公司, 辽宁朝阳 122004)

[†](国家电投集团科学技术研究院有限公司, 北京 100084)

^{**}(河南大学物理与电子学院, 河南开封 475004)

^{††}(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘要 氢气是一种零排放的二次能源, 是实现“双碳”目标的重要能源之一。采用在役天然气管道或管网输送掺氢天然气, 是实现氢气大规模输送的有效方式。精确控制进入输送系统的掺氢比例对系统安全运行具有重要意义。本文介绍了电气式和机械式随动掺氢系统的结构与原理; 分析了红外吸收型、热传导型、半导体型浓度传感器和相应的综合测量系统在掺氢比动态调整中的应用; 重点评述了目前 3 个重要在役天然气掺氢示范项目中随动掺氢系统的组成和运行结果; 基于工程实践经验展望了天然气掺氢技术的发展趋势。

关键词 天然气掺氢, 掺氢原理, 掺氢结构, 掺氢比动态测量

中图分类号: TK91 文献标识码: A doi: [10.6052/1000-0879-22-056](https://doi.org/10.6052/1000-0879-22-056)

RESEARCH PROGRESS OF NATURAL GAS FOLLOW-UP HYDROGEN MIXING TECHNOLOGY¹⁾

ZHANG Liye^{*、2)} DENG Haitao^{*} SUN Guijun^{*} NING Chen^{*} SUN Gang^{*} LIU Wei[†] SUN Chen[†]
LAN Xueying[†] LU Yanghui[†] JIA Guanwei^{**} AN Yongwei^{**} JI Shouhu^{**} XU Weiqing^{††}

^{*}(Chaoyang Yanshanhu Power Generation Co., Ltd, Chaoyang 122004, Liaoning, China)

[†](State Power Investment Corporation Research Institute Co., Ltd, Beijing 100084, China)

^{**}(School of Physics and Electronics, Henan University, Kaifeng 475004, Henan, China)

^{††}(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract Hydrogen is a secondary energy with zero emission, one of the most important energy sources to achieve the goal of “double carbon”. Using in-service natural gas pipeline or network to transport hydrogen blended to natural gas is an effective way to realize large scale transport of hydrogen. It is important to accurately control the proportion of hydrogen in the natural gas pipelines transport system. The structure and principle of electric type and mechanical type with following up hydrogen blended to natural gas system are introduced. The concentration sensors of mechanism and application with infrared absorption type, heat conduction type, semiconductor type are introduced. Then, their comprehensive measurement system in dynamic adjustment and measurement of hydrogen blended to natural gas ratio are analyzed. Three important in-service hydrogen blended to natural gas demonstration projects are introduced from the composition and operation results. Based on the engineering practice experience, the development trend of hydrogen blending to

2022-01-25 收到第 1 稿, 2022-03-01 收到修改稿。

1) 北京高校卓越青年科学家计划 (BJJWZYJH01201910006021), 国家自然科学基金 (51875012), 中国博士后科学基金 (2021M701096) 和河北省重点研发计划 (20314601D) 资助项目。

2) 张立业, 高级工程师。E-mail: 13591953019@163.com

引用格式: 张立业, 邓海涛, 孙桂军等. 天然气随动掺氢技术研究进展. 力学与实践, 2022, 44(4): 755-766

Zhang Liye, Deng Haitao, Sun Guijun, et al. Research progress of natural gas follow-up hydrogen mixing technology. *Mechanics in Engineering*, 2022, 44(4): 755-766

natural gas technology is projected.

Keywords hydrogen blended to natural gas, hydrogen mixing principle, gas-gas mixing structure, dynamic measurement of hydrogen mixing ratio

巨量化石燃料燃烧产生巨量温室气体, 导致全球极端天气频繁出现, 严重威胁人类的生存安全^[1]。改变现有能源组成结构是人类可持续发展的当务之急^[2]。氢气燃烧只产生水, 可真正实现零排放, 是全球公认的清洁能源^[3]。大量研究结果显示, 天然气掺氢混合气体的燃烧能够改善终端设备的燃烧性能^[4]、减少氮氧化物污染和二氧化碳排放^[5]。然而, 由于我国可再生能源产生区域(中西部)和用能区域(东南沿海)的不匹配; 同时“三弃”的电量巨大, 造成大量电力浪费^[6]; 现在氢气的运输方式和运力有限, 一般是高压储气罐运输, 成本高, 运输距离受限, 不能长距离运输。

我国现有天然气管线具有覆盖广、传输距离长、输运量大等特点; 截止2019年, 我国在役天然气输送管道总长度高达 8.7×10^4 km^[7]。因此, 天然气中掺入一定比例氢气后, 利用天然气管道或管网进行输送, 是促成氢气大范围运送的有效途径^[8]。与高压或液化氢气的输送方式相比, 利用管道或管网输送掺氢天然气可实现我国现有在役天然气管道和城市输配气管网的充分利用, 便于氢气大范围、长距离、低成本运送^[9], 并且现役输送管网的改造或维护费用不高, 甚至直接使用^[10]。利用天然气管路安全输送掺氢天然气到终端用户时, 掺氢天然气既可直接作为燃料供给家用燃气具、天然气汽车等, 也可将其分离出的氢气供给加氢站、燃料电池发电设施等^[11]。

天然气管网组成非常复杂, 主要部分为供气站、输气管道和住宅终端用户^[12]。天然气掺氢后对现有天然气管道输送系统和终端用气单位产生不同程度的作用^[13]。不同的掺氢比会导致燃气的燃烧速度、热负荷系数等燃烧指数以及相对密度、传热系数、黏度等水力指数均发生改变, 因此对管道输送工况和终端用户都有很大影响^[14]。如, 由于热值的不同, 引起后端用气设备的运行状态不稳定, 容易增加氢气的聚集浓度, 增加输送系统的氢腐蚀风险^[15]。天然气流量根据用户的需求

实时变化, 为保持掺氢比的稳定, 掺氢流量需跟随天然气流量变化, 因此, 随动掺氢对燃气输送的稳定性和安全性起到关键作用。且随动流量比例调节对掺氢比有较高精度控制, 而相关的项目都是采用该技术。但因掺氢天然气特殊的物理化学特性^[16], 当前需要研究天然气掺氢系统是否适合长期工作于天然气掺氢环境。西方主要发达国家正在对这方面开展研究, 同时欧洲标准化委员会也正在有序进行天然气掺氢混合技术及工艺设备的标准化研究制定^[17]。

然而, 我国整个天然气掺氢系统的研究还处于起步阶段, 研究不多。国家电投朝阳天然气掺氢示范项目具有典型的实际应用, 因此, 本文在该项目应用的基础上, 归纳总结天然气随动掺氢技术、掺氢原理、掺氢装置、掺氢比动态测量技术及工程实例, 为天然气掺氢技术的大范围应用提供参考借鉴。

1 天然气随动掺氢技术

典型的天然气随动掺氢系统, 如图1所示。主要包括: 氢气输送系统、天然气输送系统、随动掺氢结构、混合系统、气体流量测量系统和调控系统。由于用气端需要的掺氢天然气流量波动性大, 这就需要供气端的随动掺氢装置具备流量动态测量和控制能力。两股或多股气体混合主要通过分子扩散和对流扩散两种形式, 后者一般为湍流扩散, 即气体流动处于湍流状态的对流扩散。当混合由某股气体流动主导和驱动时, 工程上也称为主体扩散, 主体扩散往往需要通过特殊设计的混合器结构来实现主流和添加气流之间的均匀混合。均匀性也是随动掺氢需要关注和控制的技术指标。天然气随动掺氢属于一种气体混合技术, 需要考虑掺氢、管道输送和终端用户共三个环节, 最终确定合适的掺氢体积比, 使得天然气氢气混合物的体积比在所有环节处于稳定安全状态, 达到掺混气体减小波动幅度、泄漏的风险和提高均匀性、安全性的目的^[18]。目前芬兰、瑞士、奥地

利、西班牙等欧洲国家规定天然气管道中掺氢体积比上限分别为 1%, 2%, 4%, 5%^[19]。我国目前仅有掺氢天然气管道输送示范项目“朝阳可再生能源掺氢示范项目第一阶段工程”的掺氢体积比约为 5%^[20]。当前各国规定的掺氢比都较低,但多个国家均计划未来将掺氢体积比上限提高到 20% 左右^[21-23]。

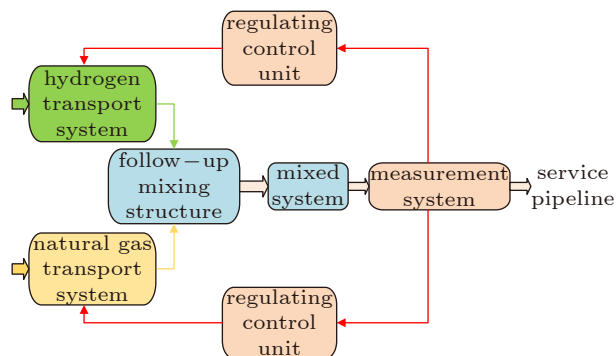


图 1 天然气随动掺氢系统

Fig. 1 System of natural gas follow-up hydrogen mixing

1.1 随动掺氢结构

目前,随动掺氢按实现方式可分为机械式和电气式。机械式包括:浮子式、柱塞式、文丘里式和二进制式。上述掺氢结构需要搭配控制系统才能保证掺氢比例,以确保用气端的稳定使用。

1.1.1 电气式随动掺氢结构

如图 2 所示电气式随动掺氢结构由流量计量、信号传输反馈、流量控制系统、比例校准等环节构成。其原理是根据采集系统采集的参数,通过控制系统发出控制信号,调节掺混工艺中流经调节阀的单一流体或多种流体混合物的流动。主要包括:流量计、比例式流量阀、混合器、后端采集系统、控制系统等。基于流量计量的随动掺氢结构主要是以质量/体积流量计进行气体的测量,并反馈给各气体调控阀控制阀口开度的结构。

国家电投朝阳天然气掺氢示范项目掺混设备采用的就是电气式随动掺氢结构。天然气作为主气源,氢气作为随动气源。由天然气管路流量计和氢气管路流量计分别检测出两路气体的流量大小,两路流量信号进入 PLC (programmable logic controller) 控制系统,经 PLC 控制系统运算处理后,输出控制信号给位于氢气管路上的调节阀,改变调节阀的开度大小,从而控制氢气进入混合

器的量,对混合气实现自动调节。该项目氢气进口压力为 15 MPa,掺氢量按照 3%~20% 设计,采用阶梯过渡的方法,目前已按照 10% 的掺氢比例安全运行 1 年。

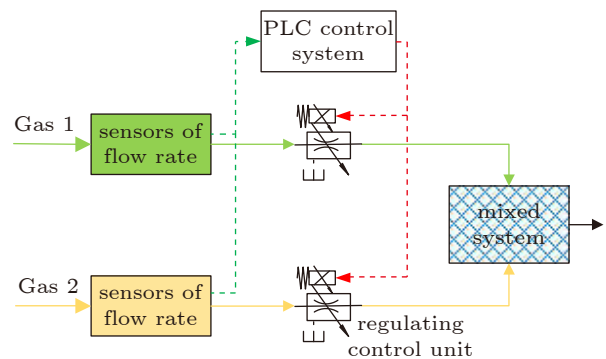


图 2 电气式随动掺氢结构

Fig. 2 Structure of gas mixer with electrical control

压力差随动掺氢结构可以是电气式或机械式随动掺氢结构实现形式。原理基于理想气体状态方程实现气体掺混。几种气体经过某一管道后进入掺混装置,仅高精度地控制掺混装置前部管路中气体的压力差,就能实现高精度的气体掺混。调控管路的压力差比可控制多种气体不同的掺混比例;进而调控阀门孔径尺寸调整气体流通面积,控制气体的掺混比例。此结构通过实现调整气体压力差进而完成了对掺混气体流量的控制,配气速度较快,混气阻力低,压力损失较小,但对于压力控制要求较高^[24]。

Sigas SDI 公司的 CONSTA-MIX 机械式混气阀根据下游反馈的压力波动控制共轴的两个锥形阀门开度,可以实现预设的掺气比^[25]。混合气体流量通过 3 个浮动可变孔口实现自动精确调节。混合过程不需要电子控制装置的信号回馈,消除失效或需校准的问题。这种混合器运作简单而安全,由横向连接的调压器来调控混合阀两端阀口的压力,使其保持平衡。

1.1.2 机械式随动掺氢结构

机械式随动掺氢结构是通过机械式联动控制机构对管道中的阀门开度进行控制进而实现对气体体流量的调控,即可实现对各气体相对流量的精确调控。调节装置通过调节阀口开度控制流体流量大小。每一种气体连续流动在装置中的流量均由流量计控制,气体通过控制阀和流量计后,

进入低压回路，连动流量控制机构。主要的实现形式：浮子式、柱塞式、文丘里式和二进制式等随动掺混结构。

(1) 浮子式

浮子式气体随动掺混结构是气体混合的常用装置，主要由校正的浮子或浮球流量计和手动控制阀组成，如图3所示，其结构简单、压力损失小、流量示值直观、应用广泛且易于维护。但由于浮子流量计需目测及手动调整控制阀的人为操作原因，导致其混合气体的测量精度相对较低[26]。

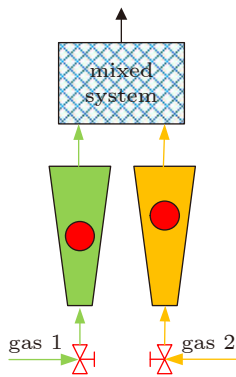


图3 浮子式气体随动掺混结构

Fig. 3 Structure of gas mixer with floating ball

(2) 柱塞式

柱塞式掺混结构是两个或多个不同直径的气缸柱塞，以设定气体流量产生高精度的混合气体，如图4所示。在实际的应用中，由于气缸柱塞尺寸的限制，流量小、无法在较长时间内获得连续且大流量的气体混合物。

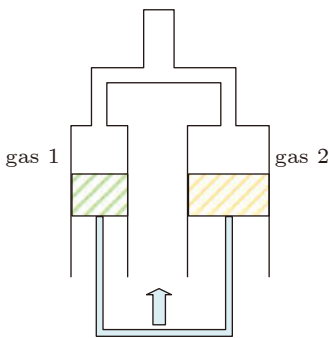


图4 柱塞式掺混结构

Fig. 4 Structure of gas mixer with plunger

(3) 文丘里式

文丘里式引射随动掺混结构是一种重要且应用广泛的机械式随动掺氢结构实现形式[27]，如图5所示。由伯努利定律可知，高速流动气体经过缩

流截面时，气体的流速增大而流体压力减小，产生高速低压效应而制造引射随动掺氢结构[28]。此结构配气速度快、流量大。压力损失在7 kPa左右，损失较小。但对波动适应性不够灵活，仅能混合定值流量比的工作气体与引射气体。

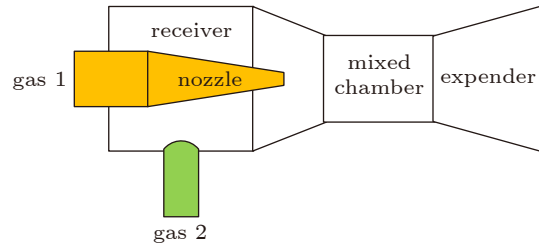
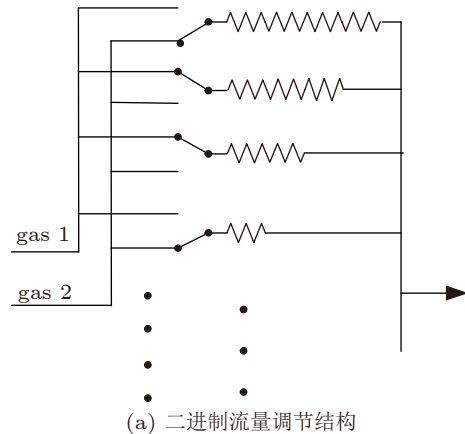


图5 文丘里式引射随动掺氢结构

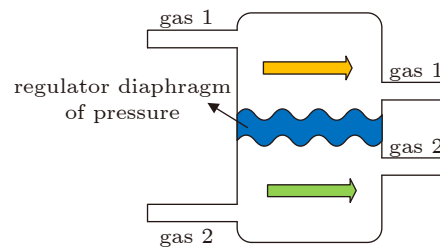
Fig. 5 Structure of gas mixer with Venturi ejection

(4) 二进制式

基于计算机的二进制逻辑原理和泊肃叶定律，通过两组不同长度的平行气体管路，并在公共端口连接二通阀。在气体流动过程中，压力与流体的动态黏度成反比，按二进制计数的顺序开闭二通阀门，使一种气体的流量增加，而另一种气体的流量降低，可以实现不同比例混合气体的流量[29]，但当两种气体的入口压力差异较大时，混合精度对输出压力的波动非常敏感，如图6(a)



(a) Structure of binary flow rate regulator



(b) 稳压结构
(b) Structure of pressure regulator

图6 二进制掺混结构

Fig. 6 Structure of gas mixer with binary

所示。然而，要实现混合气体流量的准确掺混，关键是要实现两种及以上供气源压力相等，保证必须与掺混气体的比例具有相同黏度^[30]，如图 6(b) 所示。

2 掺氢比动态测量

二元或多元混合气体流量和浓度的高响应和瞬时测量技术对高效生产和提高精度有着重要的影响。根据测量流量和浓度的原理不同，可分为直接测量和间接测量。直接测量是传感器直接识别出气体的种类，而间接测量是传感器测量气体特性进而识别并推导出气体种类。气体传感器主要分为红外吸收型、热传导型、半导体型等。

2.1 红外吸收型

红外吸收型气体传感器基于 Lambert-Beer 吸收定律，利用不同气体对特定红外吸收峰的共振，产生特征吸收光谱，从而精确地测量气体的浓度。原理如图 7 所示，主要由红外 LED (light emitting diode) 光源发生器、红外探测接收器、光学检测气室等组成。可对多种气体的浓度进行检测，广泛应用于矿井瓦斯安全、油气勘探、大气污染监测等方面^[31]。一般用于对甲烷，二氧化碳浓度的检测，对二氧化碳的浓度测量范围约为 0~3%。其克服了传统传感器催化及电化学过程中毒老化导致寿命缩短的缺点，同时具有响应快、精度高、气体选择性好等优点。但其目前制造成本较高，在环境适应性方面也有一定缺陷^[32-33]。

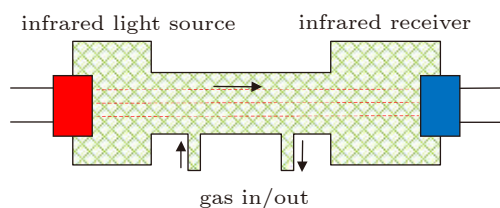


图 7 红外吸收型气体流量传感器原理

Fig. 7 Principle of gas flow sensor with infrared absorption

Zhang 等^[34]研制了一种基于红外吸收式气体传感器，用于测量二氧化碳浓度。在标准大气压条件下，将浓度为 1.54% 的二氧化碳持续注入传感器中，300 ms 后得到二氧化碳的浓度测量范围为 0~3%，稳定性为 0.7%。同时，采用 10 种 CO₂ 标准气体测试，得到 CO₂ 传感器的重复性误差和精度分别为 0.024% 和 0.026%。随机选择浓度

0.5% 的 CO₂，稳定后的响应时间为 2.5 s。传统 CO₂ 气体传感器使用采样泵将气体收集到空气室中，不仅增加了传感器的体积、重量和功耗，而且降低了传感器的可靠性，而红外 CO₂ 气体传感器的优势是频谱宽、响应快、灵敏度高、识别度好。

Zhang 等^[35]开发出一种既没有电路也没有同步新型红外二氧化碳气体分析仪。输入参数为传感器输出电压和温度，采用 RBF (radial basis function) 神经网络建立了气体浓度精度的对应关系，同时分析 CO₂ 的浓度。通过调整网络训练参数，达到误差值收敛至预定阈值，得到网络训练偏差为 0.018%，而测试偏差为 0.023%。在没有气体泵的条件下，采用动态补偿过滤器能够获得良好的动态特性。CO₂ 气体对 4.26 μm 的红外能量表现出强烈吸收，对 3.9 μm 的红外能量无反应，需要透射波长为 3.9 μm 的滤波器做补偿，得出红外二氧化碳分析仪气体的浓度测量范围为 0~3%，准确度为 ±0.028%，响应时间小于 215 s (无空气泵)；此红外二氧化碳分析仪具有体积小、功耗低、精度高、机械可靠性高和使用寿命长等优点。

2.2 热传导型

热式质量流量计的工作原理是在有温度梯度的温度场中，介质流动时会带走一定的热量，且在单位时间内带走的热量和介质的质量流量成比例关系。热传导型气体传感器检测气体种类广泛、寿命长、适应性强，有氧或无氧环境中都可以实现对气体的浓度检测。检测范围大，最高检测浓度可达 100%。装置结构简单、价格低廉、使用维护方便。但在高温工作条件下其辐射热过高易造成检测精度差、响应时间慢、温度漂移大等缺点^[36]。一般的热式质量流量计都是基于上述原理制成的，如图 8 所示。

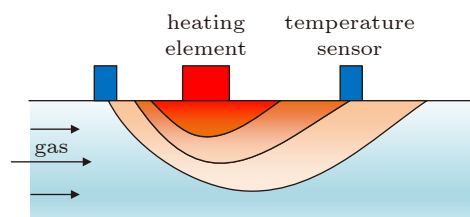


图 8 热传导型气体传感器原理

Fig. 8 Principle of gas flow sensor with heat conduction

国家电投朝阳天然气掺氢示范项目在混合气管路设置了氢气分析仪,其属于热传导型传感器,可以精准检测混合气中氢气的变化,根据氢气分析仪测得的数据,来控制氢气管路上调节阀开度,从而控制氢气流量,达到天然气和氢气的精确配比。该类传感器内有一个微处理器提供信号处理和温度补偿,可以获得通常的热传导传感器所提供不了的精度和检测量程,响应速度为(T90) 20 s,且具有较高的稳定性,几乎或根本不需维护。

Shinya^[37]采用安装MEMS(micro-electromechanical system)芯片的热流量传感器,控制气体流量,并通过两个不同温度下获取两组热导率值来估算三元气体中(氮气、氧气、氩气)的氧浓度。当气流平行经过传感器芯片表面时,使上风端和下风端热电堆之间的温差随气流强度变化而产生电动势的变化,进而用于气体流量检测。在二元体系中,气体的热导率仅因与氮气的混合比而变化,分析了氩含量对氧的浓度检测影响性很大。当氩比升高到7%时,氧浓度误差约为50%。误差大的原因是因为氩氧本身的热导率因氩比的变化而变化。而以三元系统方法计算氧浓度误差范围为-3%到±2%,远优于二元系统。

Hepp等^[38]设计了一种基于热式流量传感器的特殊传感器,实现对二元混合气体浓度和流量的测量。包括两个温度传感器和一个焦耳加热器,通过两种独立的激励模式(功率和温度)实现对二元混合气体浓度和流量的测量。焦耳加热器产生热量,使气流温度达到稳定,传感器测量得到温度和混合气体的热传导率以获得混合气体的浓度。同时,依据随流量增加,温差不断增大,由上下游的温差得到流速。测量结果显示,气体浓度的准确度为5%,流速的准确度为3.3%。

2.3 半导体型

利用半导体材料的气敏特性,开发出了可对气体进行有限检测的半导体气敏性材料,实现半导体材料对气体浓度和流量的测量。半导体气体传感器^[39]分为电阻型和非电阻型,其中电阻型半导体气体传感器具有灵敏度高、体积小、成本低、工作电路简单等优点,其不足之处是工作温度过高须辅以加热元件导致工艺难度上升。检测浓度限度过高,气体浓度较低时的响应较差^[40],长期

稳定性和选择性较差。非电阻型半导体气体传感器是利用半导体材料的物理特性和器件特性实现对目标气体的检测,如图9所示。

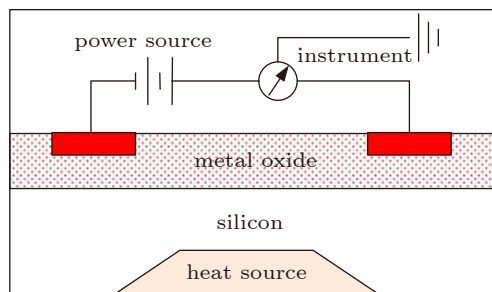


图9 一个典型的半导体气体传感器

Fig. 9 Principle of gas flow sensor with semiconductor

Tetsuya等^[41]采用基于 SnO_2 多孔膜的半导体气体传感器,通过传感器表面吸收气体导致半导体的电阻变化来测量气体浓度。在半导体传感器装置被加热到 $250^\circ\text{C}\sim 350^\circ\text{C}$ 的条件下,将流量 $120\text{ cm}^3/\text{min}$,浓度1‰的 H_2 和 CO 混合气体充入半导体传感器,充入时间为0.3 s。在 250°C 和 350°C 时, H_2 和 CO 响应时间分别为小于1 s和0.5 s;空气切换为混合气体的切换时间对响应时间影响大。如切换时间0.3 s时,响应时间可能小于0.5 s,如果切换气体的时间减少,响应时间可能更短。

Utembe等^[42]基于三氧化钨(WO_3)开发出一种新型便携式半导体传感器,利用 WO_3 良好的电子特性变化导致电阻的变化来测量臭氧浓度。金属氧化物对臭氧的敏感性归因于表面氧空位的存在,臭氧分解所形成的氧空位的填充会捕获自由载流子,从而导致电阻变化。将传感器温度从 600°C 切换到 530°C (测量温度),恒定臭氧浓度的空气以 $3\text{ L}/\text{min}$ 的流量充入传感器,臭氧浓度为13 ppb, 27 ppb, 35 ppb, 45 ppb, 56 ppb, 68 ppb时,响应时间分别约为700 s, 380 s, 310 s, 250 s, 230 s, 200 s。臭氧浓度越高,电阻变化越大,响应时间越短,灵敏度越高;臭氧浓度为43 ppb时,将传感器温度从 530°C 切换到低温 500°C ,传感器灵敏度提升,但响应时间从250 s增加至300 s。

2.4 综合测量型

在实际的应用过程中,红外吸收型适用于低浓

度气体测量；半导体型适用于高浓度气体测量；热传导型检测范围大，检测浓度可达 100%，但其精度、灵敏度等都较差。可结合现有的掺混结构和检测设备，提取出其优点进行组合设计出综合测量系统，在测量精度、响应时间等方面进一步优化。

文献 [43] 使用文丘里流量计和层流流量计搭建测量二元气体混合物中气体浓度和气体混合物总流速的系统，能够瞬时测量混合气体的流量和浓度。实验可以同时测量空气和二氧化碳、空气和氦气混合气体流量、浓度的静态、动态特性。在混合气体温度 293 K，供气压力 0.5 MPa，流量 $5.00 \times 10^{-4} \sim 10.0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 的条件下，空气和二氧化碳的静态特性中的流量误差在 $-0.6\% \sim 1.6\%$ 以内，浓度的测量误差在 $-7.6\% \sim 6.3\%$ FS (full scale) 以内。同时，空气和氦气的静态特性中的流量误差在 $-2.4\% \sim -0.1\%$ 以内，浓度的测量误差在 $-8.8\% \sim 6.7\%$ FS 以内。实验测量了空气和二氧化碳的动态特性，流量改变的时间在 0.3 s 以内，而浓度的改变时间在 0.2 s 以内，比现有的流量和浓度改变时间有所提高。采用此方法能有效提高混合气体的测量精度、缩短响应时间。

Youn 等 [44] 使用流量计组合（超声波流量计和文丘里流量计、超声波流量计和层流流量计），可检测二元混合气体的浓度和流量。对氦气和空气的混合物进行实验，当混合气体流量采样时间为 1 ms 时，测得氦的摩尔分数从 0.1 变为 0.9。混合气体流量为 $5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 时，文丘里流量计和层流流量计的组合测量误差超过 20%；混合气体流量为 $7.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 时，文丘里流量计和层流流量计的组合测量误差将近 10%。由于评估气体混合比的方程式的因素，评估混合比显示出相当大的误差；当使用超声波流量计代替文丘里流量计时，超声波流量计和层流流量计的误差小于 $\pm 4.0\%$ ，误差明显减小，而流量计精度在读数的 $\pm 2\%$ 范围内。

文献 [45] 使用小型临界喷嘴、层流流量计和压差传感器构建一种用于检测气体混合物不同浓度的传感系统。根据不同组分的气体流经层流结构两端产生不同的压降原理，可以实现 CBrF_3

与 N_2 以及 C_3HF_7 与空气的浓度检测。实验时保持通过层流流量计和临界喷嘴的气体混合物的温度恒定，温度变化不超过 0.3°C 。在外界环境为 23°C ，0.1 MPa 的条件下，将系统的温度保持在 70°C ，对于 CBrF_3 与 N_2 的气体混合物，测量制备混合气浓度 0~10% 的范围，精度的绝对误差小于 $\pm 0.5\%$ ，在较高浓度下绝对误差为 $\pm 1.5\%$ ，响应/恢复时间分别为 0.11/0.15 s；对于 C_3HF_7 与空气的混合物，浓度调控范围为 0~30%。通过快速切换气体来测量响应/恢复时间，响应时间小于 10 ms，检测器信号可以快速稳定。将浓度改变为 0 和 29.9%，当实际浓度达到测量浓度的 90% 时，传感系统响应时间和恢复时间分别为 0.21 s 和 0.26 s。结果表明，该系统具有响应/恢复时间快、准确度高、重复性好等特点。

文献 [46] 设计了一个由科氏质量流量、密度、压力和热流量传感器以及集成 MEMS 芯片组成的系统，通过这个系统可以测量介质的黏度、密度、热容和流速，根据测得的介质性质计算混合气体组分。将氮气和氦气的混合物以恒定流量 10 mL/min 流入系统，根据校准曲线和科里奥利与热流量传感器测量的比值，确定混合物的热容，测量的热容与实际热容相差不超过 3%。根据测得的总热容和已知的氮气和氦气的热容，得出氮气在氦气中的比例。这种方法可确定组分在 10% 以内的混合气体，其精度优于 10%。通过热流量传感器控制气体流量，以恒定流量 1 L/min 提供混合气体，在科里奥利流量传感器上，流量处于哈根-泊索叶层流状态下，压力和体积流量之间存在线性关系，根据已知的密度和热容，测出体积流量分数，体积流量分数的计算误差小于 1%，响应时间在 2 s 左右。对二元混合物的精度为 1%，三元混合物的精度为 3%。

Kong 等 [47] 构建并仿真了三维螺旋静态混合器及实验，验证了天然气掺氢的混合状态。重点研究了混合单元数、扭转角的分布、混合装置距离、布置方式对混合气体的变化系数 (coefficient of variation) COV 和压力损失的影响，具体实验测试系统装置，如图 10 所示。确定了 3 个混合单元能够使混合气体压力损失最小，为 52.8 Pa，COV 为 1.45%。当扭角 $\theta = 120^\circ$ 时， COV_{\min} 为

0.66%，压损为 52.26 Pa。对比了三种布置方式，COV 能够从 14.68% 降至 1.45%。为天然气掺氢混合器结构的优化提供了依据。

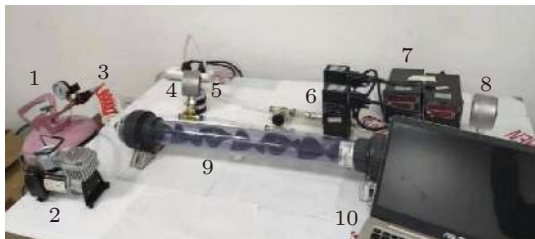


图 10 实验测试系统装置^[47]

Fig. 10 Equipment in experiment and test system^[47]

3 工程实例

天然气掺氢相关技术项目逐渐展开，由于各天然气掺氢项目在具体的实验场地，技术实现，具体运行参数公开较少；同时，关于结论方面的

信息披露得也较为零散和专业程度不足。目前，全球天然气掺氢示范项目有 39 个，输送量高达 2900 t/a^[48]。因此，总结已有项目的研究成效，为天然气掺氢项目提供技术支持。

3.1 欧盟 NaturalHy 项目

为了评估掺氢对现有天然气管网的影响，39 个欧盟合作单位于 2004 年开始建设 NaturalHy 项目^[49]。从“绿氢”和“输氢”两种策略出发，加速氢经济的转型，如图 11 所示。

该项目在掺氢天然气研究方面，主要对燃烧特性、管道耐久特性、管道的能量容量特性、气体泄漏造成的能量损失特性进行了研究。开发了集成管理软件用以评估管道失效概率。对掺氢天然气比从 100%，70%，50% 至 20% 进行了管道断裂韧性和安全风险相关实验和研究。得出在没有额外测量控制设备增加的现有条件下，管道能安全输送 20% 的掺氢天然气，爆炸风险极低。

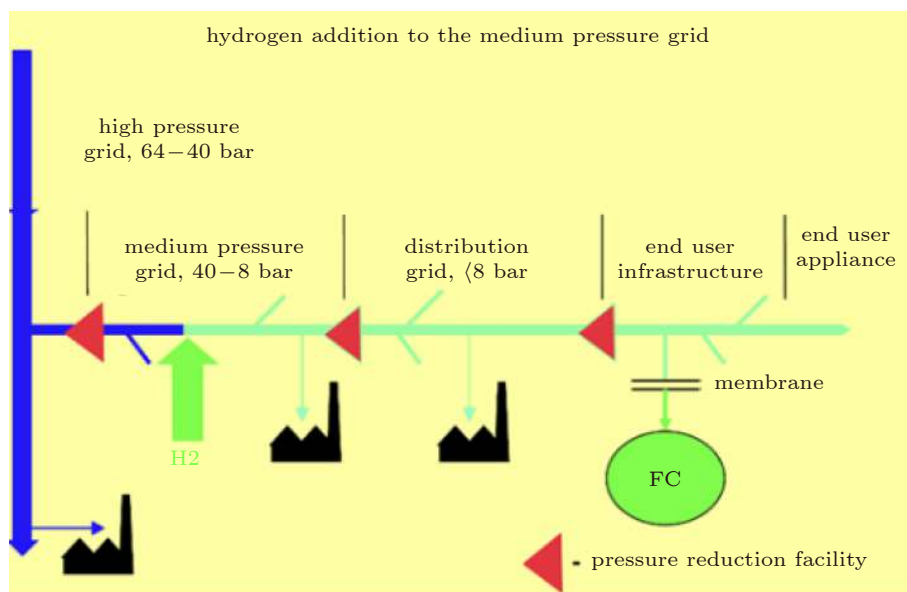


图 11 NaturalHy 概念图^[49]

Fig. 11 Concept map of NaturalHy^[49]

3.2 英国 HyDeploy 项目

为了到 2050 年实现净零，英国能源供应公司于 2017 年开展了“HyDeploy”天然气掺氢项目^[50]。目前，从第一阶段在基尔大学进行安全试验工作得出的结论表明，利用现有天然气管道加入摩尔质量分数为 20% 的氢气是可以安全运行的。项目将继续进行，最终推动天然气掺氢的商业化发展。其整体结构如图 12 所示。图 13 展示了 12 h 内的

混合氢比例为 10% 的氢气需求以及 12 h 内的混合天然气的的需求。

3.3 国家电投辽宁朝阳天然气掺氢示范项目

国家电投集团燕山湖发电有限公司联合国家电投集团科学技术研究院，于 2018 年在辽宁朝阳开展国内首个天然气掺氢示范项目研究^[51]。利用可再生能源电解碱液产生 10 m³/h（气体标准

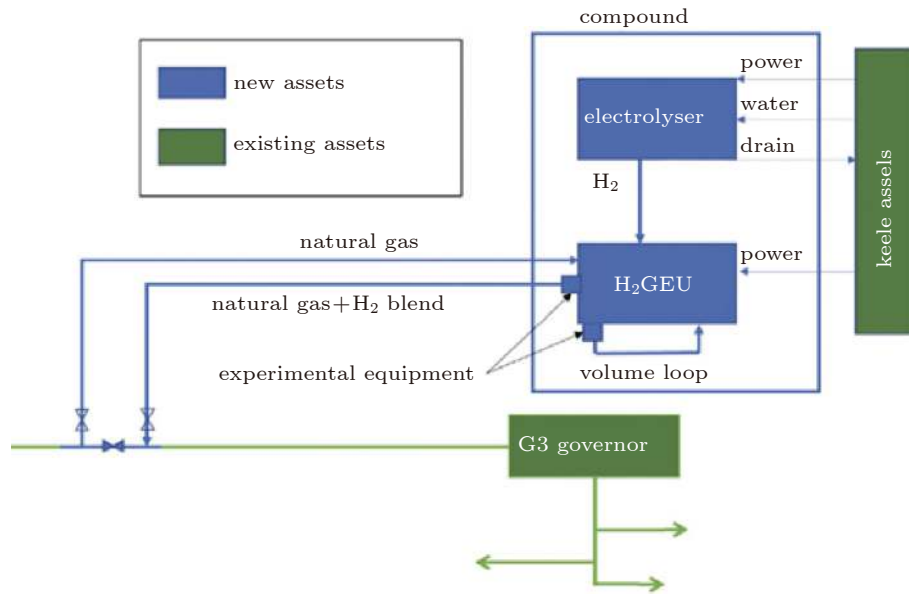
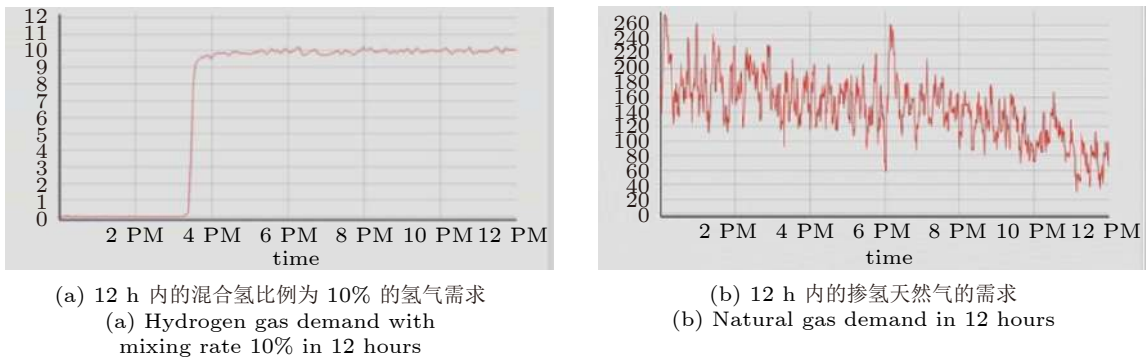


图 12 HyDeploy 项目设计流程图^[50]

Fig. 12 Design flowchart of HyDeploy project^[50]



(a) 12 h 内的混合氢比例为 10% 的氢气需求
(a) Hydrogen gas demand with mixing rate 10% in 12 hours

(b) 12 h 内的掺氢天然气的的需求
(b) Natural gas demand in 12 hours

图 13 HyDeploy 项目天然气掺氢运行参数^[50]

Fig. 13 Operation parameters of HyDeploy project gas hydrogen mixing^[50]

状况)的“绿氢”，设计掺氢比为 3%~20%，实际运行以 10% 的掺氢比例做为燃料使用，其采用电气式随动掺氢结构，具体布局及实物结构图，

分别如图 14 和图 15 所示。主气源天然气和随动气源氢气根据各自的实时流量、温度、压力采集数值，通过 PLC 控制系统，结合阶梯过渡的算

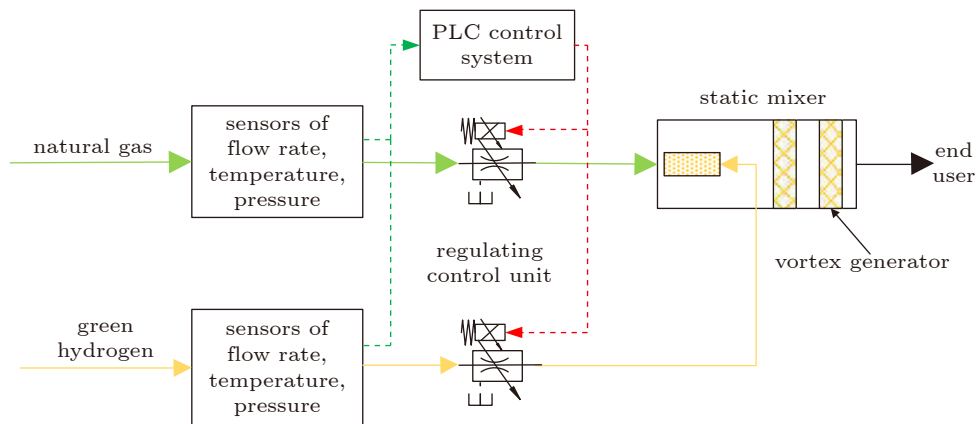


图 14 朝阳示范项目具体布局示意图

Fig. 14 Layout diagram of Chaoyang demonstration project

法,控制调节装置开度,对混合气实现自动调节。同时,混合气体经静态混合器中多组涡流发生器将两种气体充分混合,供终端用户使用。

2021年10月,该项目在民用终端应用验证方面取得了新进展,成功召开了应用成果见证会。图16展示了2021年6月份朝阳示范项目6天的运行数据,虽然天然气的用气量在 $71.37\sim 126.36\text{ m}^3$ (气体标准状况)之间波动,但其随动掺氢比例一直稳定在 $8.81\%\sim 8.84\%$,展现了精准的掺氢性能。此项目已安全运行了1年,在此过程中,探索了天然气掺氢工艺、输送过程、掺氢比对管道的腐蚀作用、安全监测以及使用过程的整体流程研究。鉴于此项目的理论和实践积累,编制了“天然气掺氢混气站技术规程”团体标准意见稿。为我国天然气掺氢输送技术发展提供了整体设计和工程实现的理论依据和实践经验。

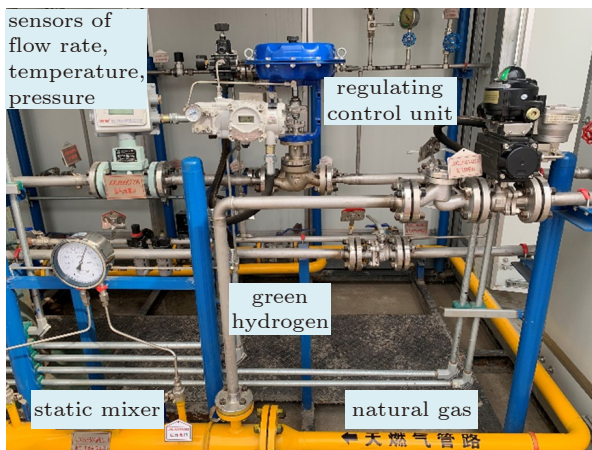


图15 朝阳示范项目设备

Fig. 15 Equipment of Chaoyang demonstration project

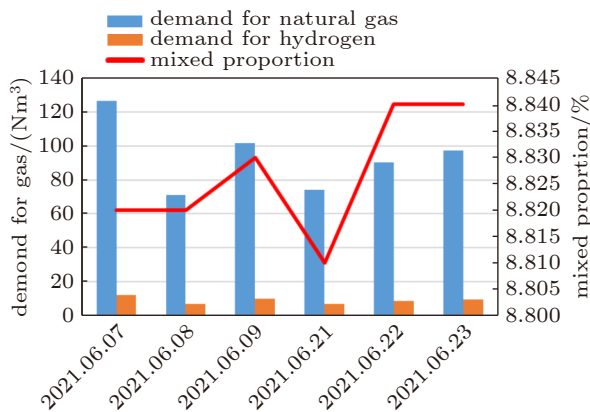


图16 朝阳示范项目运行数据

Fig. 16 Operation parameters of Chaoyang demonstration project

4 展望

为保障“双碳”任务的完成,从2020年以来,国家能源局发布《中华人民共和国能源法》、国务院办公厅正式发布《新能源汽车产业发展规划(2021—2035年)》、中国氢能联盟正式发布实施《低碳氢、清洁氢与可再生能源氢的标准与评价》等一系列政策和法规,大力促进氢能产业的健康快速发展。

本文针对天然气随动掺氢的研究现状进行了综述,如下。

(1) 基于气体低密度、低黏度的特点,介绍了气-气掺混原理及主要分类方式。结合分子、湍流和对流扩散的多种作用才能更好地提升掺混速度和均匀度。

(2) 天然气掺氢实现的重要组成部分是随动掺氢结构的实现,综述了电气式、机械式随动掺氢结构;根据不同的应用需求,选择不同的掺氢结构,为随动掺氢结构的发展提供了参考。

(3) 掺氢比的动态测量是实现掺混精度和调控的重要依据,综述了红外吸收型、热传导型、半导体型气体浓度传感器的响应时间和精度;同时,对同时能测量流量和精度的综合测量型系统进行总结;精度小于 $\pm 0.5\%$,响应时间小于1s的流量和浓度测量的目标,为掺氢比动态调整提供了测量依据。

(4) 综述了3个重要在役天然气掺氢项目,介绍了其系统组成和运行结果。运行结果表明该系统可在掺氢比为 $3\%\sim 20\%$ 的范围内安全运行,为大规模天然气掺氢项目的进展提供实践依据和工程经验。

参 考 文 献

- 1 Statistical review of world energy. [2020-6]. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>.
- 2 习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话(全文). [2020-9]. <http://www.qstheory.cn/yaowen/2021-09/22/c-1127887219.htm>
- 3 IEA. The future of hydrogen. [2019-7]. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- 4 Genovese A, Contrisciani N, Ortenzi F, et al. On road ex-

- perimental tests of hydrogen/natural gas blends on transit buses. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011, 36(2): 1775-1783
- 5 Sierens R, Rosseel E. Variable composition hydrogen/natural gas mixtures for increased engine efficiency and decreased emissions. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2000, 122(1): 135-140
- 6 国家能源局. 2021年一季度网上新闻发布会文字实录. [2021-1-3]. <http://www.nea.gov.cn/2021-01/30/c139708580.htm>
- 7 李敬法, 苏越, 张衡等. 掺氢天然气管道输送研究进展. *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. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(4): 137-152 (in Chinese)
- 8 Ogden J, Jaffe AM, Scheitrum D, et al. Natural gas as a bridge to hydrogen transportation fuel: insights from the literature. *Energy Policy*, 2018, 115: 317-329
- 9 Witkowski A, Rusin A, Majkut M, et al. Analysis of compression and transport of the methane/hydrogen mixture in existing natural gas pipelines. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2018, 166: 24-34
- 10 殷卓成, 杨高, 刘怀等. 氢能储运关键技术研究现状及前景分析. *现代化工*, 2021, 41(11): 1-7
- Yin Zhuocheng, Yang Gao, Liu Huai, et al. Research status and prospect analysis of key technologies of hydrogen energy storage and transportation. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(11): 1-7 (in Chinese)
- 11 周承商, 黄通文, 刘煌等. 混氢天然气输氢技术研究进展. *中南大学学报(自然科学版)*, 2021, 52(1): 31-43
- Zhou Chengshang, Huang Tongwen, Liu Huang, et al. Research progress of hydrogen transport technology for blended hydrogen natural gas. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2021, 52(1): 31-43 (in Chinese)
- 12 Zhao Y, McDonell V, Samuelsen S. Influence of hydrogen addition to pipeline natural gas on the combustion performance of a cooktop burner. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(23): 12239-12253
- 13 De Vries H, Levinsky HB. Flashback, burning velocities and hydrogen admixture: domestic appliance approval, gas regulation and appliance development. *Applied Energy*, 2020, 259: 114116
- 14 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. *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. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(3): 130-136 (in Chinese)
- 15 Zhou ZR, Zhang KY, Hong YJ, et al. The dependence of hydrogen embrittlement on hydrogen transport in selective laser melted 304L stainless steel. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(29): 16153-16163
- 16 Xiang LK, Jiang HT, Ren F, et al. Numerical study of the physical and chemical effects of hydrogen addition on laminar premixed combustion characteristics of methane and ethane. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(39): 20501-20514
- 17 Melaina MW, Sozinova O, Penev M. blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues. NREL/TP-5600-51995, United States, 2013
- 18 Haeseldonckx D, D'haeseleer W. The use of the natural-gas pipeline infrastructure for hydrogen transport in a changing market structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(10): 1381-1386
- 19 International Energy Agency. The future of hydrogen: Seizing today's opportunities. [2020-5-24]. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- 20 国家电投集团东北电力有限公司. 国家电投天然气掺氢示范项目第一阶段工程圆满完工. [2020-12-1]. <http://chuneng.bjx.com.cn/news/20191015/1013302.shtml>
- 21 Fuel Cell Sworks. Hydrogen levels in German gas distribution system to be raised to 20 percent for the first time. [2020-5-24]. <https://fuelcellsworks.com/news/hydrogen-levels-in-german-gas-distribution-system-to-be-raised-to-20-percent-for-the-first-time/>
- 22 Sam M. French gas networks could mix in green hydrogen in future, say operators. [2020-5-24]. <https://www.euractiv.com/section/energy/news/french-gas-networks-could-mix-in-green-hydrogen-in-future-say-operators/>
- 23 ITM Power. HyDeploy: UK gas grid injection of hydrogen in full operation. [2020-5-24]. <https://www.itm-power.com/news/hydeploy-uk-gas-grid-injection-ofhydrogen-in-full-operation>
- 24 逢锦伦. 基于煤矿瓦斯工业化利用的混(配)气装置应用现状及前景展望. *矿业安全与环保*, 2020, 47(4): 112-115
- Pang Jinlun. Application status and prospect of mixing (distributing) gas device based on coal mine gas industrial utilization. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2020, 47(4): 112-115 (in Chinese)
- 25 CONSTA-MIX. Gas mixing system. <http://www.algas-sdi.com>
- 26 Degin H, Lundsgaard JS. Dynamic gas mixing techniques. *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*, 1980, 3(4): 233-242
- 27 龚英利. 天然气发动机进气管内混合气形成过程的可视化研究. [硕士论文]. 天津: 天津大学, 2003
- Gong Yingli. Visualization of air-natural gas mixing process in the intake manifold for natural gas engine. [Master Thesis]. Tianjin: Tianjin University, 2003 (in Chinese)
- 28 Abdulaziz AM. Performance and image analysis of a cavitating process in a small type venturi. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2014, 53: 24-28
- 29 Lundsgaard JS, Einer-Jensen N, Juhl B. A pressure regulator for proportional regulation of two gas pressures. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1978, 25(3): 311-313
- 30 Majda AJ, Kramer PR. Simplified models for turbulent diffusion: theory, numerical modelling, and physical phenomena. *Physics Reports*, 1999, 314(4-5): 237-574
- 31 Dinh TV, Choi IY, Son YS, et al. A review on non-dispersive infrared gas sensors: improvement of sensor detection limit and interference correction. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, 231: 529-538
- 32 Hodgkinson J, Tatam RP. Optical gas sensing: a review. *Measurement Science and Technology*, 2012, 24(1): 012004

- 33 张清, 周李兵, 贺耀宜等. 非分光红外气体传感器研究进展. *激光与红外*, 2021, 51(10): 1272-1278
Zhang Qing, Zhou Libing, He Yaoyi, et al. Research progress of NDIR optical gas sensor. *Laser & Infrared*, 2021, 51(10): 1272-1278 (in Chinese)
- 34 Zhang GJ, Li YP, Li QB. A miniaturized carbon dioxide gas sensor based on infrared absorption. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, 48(12): 1206-1212
- 35 Zhang GJ, Wu XL. A novel CO₂ gas analyzer based on IR absorption. *Optics & Lasers in Engineering*, 2004, 42(2): 219-231
- 36 李栋辉, 孙永国, 张洪泉. 具有低辐射热的热导气体传感器设计与实现. *仪表技术与传感器*, 2021, 9: 1-5
Li Donghui, Sun Yongguo, Zhang Hongquan. Design and realization of thermal conductivity gas sensor with low radiant heat. *Instrument Technique and Sensor*, 2021, 9: 1-5 (in Chinese)
- 37 Shinya N. Oxygen gas concentration measurement in trinary mixture by small thermal conductivity gas flow sensor. *Omron Technics*, 2020: 52.010EN 2020.4.
- 38 Hepp CJ, Krogmann FT, Urban GA. Multi-parameter monitoring of binary gas mixtures: concentration and flow rate by DC excitation of thermal sensor arrays. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 265: 32-39
- 39 Dey A. Semiconductor metal oxide gas sensors: a review. *Materials Science and Engineering: B*, 2018, 229: 206-217
- 40 璩光明, 杨莹丽, 王国东等. 金属氧化物半导体气体传感器改性研究进展. *传感器与微系统*, 2022, 41(2): 1-4
Qu Guangming, Yang Yingli, Wang Guodong, et al. Research progress in properties modification of metal oxide semiconductor gas sensors. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(2): 1-4 (in Chinese)
- 41 Tetsuya K, Toru K, Masayoshi Y, et al. Study on the response and recovery properties of semiconductor gas sensors using a high-speed gas-switching system. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, 134(2): 928-933
- 42 Utembe SR, Hansford GM, Sanderson MG, et al. An ozone monitoring instrument based on the tungsten trioxide (WO₃) semiconductor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2006, 114(1): 507-512
- 43 Yamazaki S, Funaki T, Kawashima K, et al. A concentration measurement system for binary gas mixtures using two flowmeters. *Measurement Science & Technology*, 2007, 18: 2762
- 44 Youn C, Kawashima K, Kagawa T. Concentration measurement systems with stable solutions for binary gas mixtures using two flowmeters. *Measurement Science & Technology*, 2011, 22(6): 065401
- 45 Guan Y, Lu S, Zhang D, et al. A fast and easily-realized concentration sensor for binary gas mixtures and its design analysis. *Sensors*, 2018, 18(4): 1257
- 46 Wouden EVD, Groenesteijn J, Wiegerink R, et al. Multi parameter flow meter for on-line measurement of gas mixture composition. *Micromachines*, 2015, 6(4): 452-461
- 47 Kong M, Feng S, Xia Q, et al. Investigation of mixing behavior of hydrogen blended to natural gas in gas network. *Sustainability*, 2021, 13(8): 4255
- 48 Tracking Hydrogen. [2020-6]. <https://www.iea.org/reports/tracking-hydrogen-2020>
- 49 Alliat I, Florisson O. Progress obtained in the NATURAL-HY-project. <http://members.igu.org/html/wgc2006pres/data/wgcppt/pdf>
- 50 Isaac T. HyDeploy: the UK's first hydrogen blending deployment project. *Clean Energy*, 2019, 3(2): 114-125
- 51 国家电投东北公司. 国家电投辽宁朝阳天然气掺氢示范项目. [2019-9-30]. <https://news.bjx.com.cn/special/?id=1013148>

(责任编辑: 胡 漫)