

引文: 蒋宏业, 寇明月, 廖柯熹, 等. 掺氢天然气管道泄漏扩散研究现状及发展趋势[J]. 油气储运, 2024, 43(8): 855-868.

JIANG Hongye, KOU Mingyue, LIAO Kexi, et al. Current status and developmental trend on leakage and dispersion research for hydrogen-blended natural gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2024, 43(8): 855-868.

掺氢天然气管道泄漏扩散研究现状及发展趋势

蒋宏业 寇明月 廖柯熹 徐涛龙 李又绿 何国玺

西南石油大学石油与天然气工程学院

摘要:【目的】目前,将氢气以一定比例掺入天然气管网输送是发展低碳经济、解决可再生能源发电过剩而导致弃电消纳问题的有效途径,保障掺氢天然气管道安全运行对于能源发展具有重要意义。【方法】为积极应对掺氢天然气管道安全运行发展需求,基于 Cite Space 软件调研分析了 2009 年至今的国内外相关文献,具体阐述了掺氢天然气管道泄漏扩散发展进程与研究热点。在研究现状方面,将掺氢天然气管道应用场景分为受限空间(厨房餐厅、站场阀室、地下管廊及隧道)与非受限空间(架空管道、埋地管道及海底管道)两大类,分别分析了各个应用场景下的研究方法、泄漏积聚现象、扩散规律及其影响因素,并结合行业趋势与技术研究进展对未来研究方向提出建议。【结果】中国掺氢天然气管道泄漏扩散相关研究起步较晚,但发展迅速。相比非受限空间,受限空间更容易出现掺氢天然气积聚并形成爆炸性气体混合物。在研究方法上,掺氢天然气管道泄漏扩散研究主要采用数值模拟方法,基于分子动力学的理论研究较少,且实验与管道实际运行情况贴合度较低。在研究方向上,目前缺乏部分典型用氢环境的模拟研究,掺氢天然气管道泄漏扩散检测技术相关研究亟需深入。【结论】建议进一步加强开展全尺寸多场耦合实验,加强水下、高压场景下掺氢天然气泄漏扩散规律探究,同时聚焦掺氢天然气管道泄漏扩散检测技术,制定具体的量化风险评估与安全评价方法,为建立专门的掺氢天然气管道输送标准及相关监管政策提供技术支持。(图 2,表 2,参 81)

关键词: 掺氢天然气; 泄漏扩散; 管道; 研究现状; 发展趋势

中图分类号: TE832

文献标识码: A

文章编号: 1000-8241(2024)08-0855-14

DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2024.08.002

Current status and developmental trend on leakage and dispersion research for hydrogen-blended natural gas pipeline

JIANG Hongye, KOU Mingyue, LIAO Kexi, XU Taolong, LI Youlyu, HE Guoxi

Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University

Abstract: [Objective] The practice of blending hydrogen into natural gas at specific proportions for pipeline transmission serves as a viable strategy for fostering a low-carbon economy and tackling the consumption challenges linked to surplus renewable energy generation. Hence, guaranteeing the safe operation of hydrogen-blended natural gas pipelines is significant to energy development. [Methods] To offer valuable insights into the proactive response to the development requirements of hydrogen-blended natural gas pipelines, this paper presents a comprehensive review of pertinent literature, spanning from 2009 to the present, based on the Cite Space software. It elaborates on the trajectories of leakage and dispersion within the hydrogen-blended natural gas pipeline context, emphasizing key research areas within this particular domain. The research status was examined regarding the application scenarios of these pipelines, categorized into two groups: confined spaces (such as kitchens and restaurants; block valve stations and other stations; utility tunnels and other tunnels) and unconfined spaces (including overhead, buried, and submarine pipelines). Various application scenarios were scrutinized to investigate research methodologies, patterns of leakage and substance accumulation, dispersion regularities, and associated influencing factors respectively. Furthermore, this paper offers recommendations on future research directions, aligning with industry trends and advancements in technical research. [Results] Despite a delayed initiation, research on the leakage and dispersion of hydrogen-blended natural gas pipelines in China has progressed rapidly. In comparison to unconfined spaces, confined spaces provide more favorable conditions for the accumulation of

hydrogen-blended natural gas and the formation of explosive gas mixtures. In terms of research methodologies, numerical simulation approaches were found predominant in the studies within this field. Theoretical studies based on molecular dynamics were seldom conducted, and experiments were noted to be incongruent with the actual operation of pipelines. In terms of research directions, there is currently a lack of simulation studies focusing on certain typical hydrogen application environments. Moreover, there is a need for further advancement in research related to monitoring and detecting leakage and dispersion on hydrogen-blended natural gas pipelines. **[Conclusion]** Based on the study findings, recommendations include intensifying full-scale multi-field coupling experiments, expanding research on the leakage and dispersion characteristics of submarine and pressurized hydrogen-blended natural gas pipelines, concentrating on leakage and dispersion monitoring and detection techniques for hydrogen-blended natural gas pipelines, and developing practical methods for quantitative risk assessment and safety evaluation. These efforts collectively aim to provide technical underpinning for the development of specific standards and regulatory policies governing the pipeline transmission of hydrogen-blended natural gas. (2 Figures, 2 Tables, 81 References)

Key words: hydrogen-blended natural gas, leakage and dispersion, pipeline, research status, developmental trend

随着全球气候变暖进程加快,碳排放压力逐渐增大,为了达成双碳目标,需将目前以化石能源为主的一次能源结构转型为以非化石能源为主^[1]。氢能因其清洁、零碳、高效等优点,已成为世界公认的最具潜力的能源载体,但氢气在长距离输送方面面临输送成本高昂以及安全问题,成为制约氢能产业进一步发展的主要瓶颈。天然气作为目前最清洁的能源正处于蓬勃发展时期,全球已建与拟建的天然气输送管网规模庞大,因此将氢气掺入现有天然气管网开展储运是近年来国内外研究与测试的热点^[2-4]。

虽然将氢气与天然气混合输送能够节省投资与运行成本,但目前掺氢天然气技术仍不够成熟。将氢气掺入天然气管道后,气质条件更加复杂,进而需考虑掺氢天然气互换性,掺氢天然气与输送管道材料、设备的相容性,以及泄漏、积聚与燃爆等问题^[5]。掺氢天然气管道在运输过程中发生泄漏通常会造造成气体富集导致人员窒息,甚至存在爆炸危险。但掺氢天然气泄漏扩散速率及其对周边环境的影响与天然气不同^[6-7]。氢气的扩散系数约为甲烷的3.8倍,在相同条件下,管道中氢气泄漏量为甲烷的1.3~2.8倍、空气的4倍^[8]。在空气中,氢气的扩散率大于天然气的扩散率。在相同的压力与泄漏量下,氢气与天然气混合可形成较轻的气体混合物,具有更高的扩散系数、更大的体积流速^[9],且混合气体的爆炸上下限均有改变^[10-11]。

为了管道输送安全与氢能发展,需要从机理出发研究掺氢天然气泄漏扩散规律,制定相关安全标准,预防掺氢天然气管道泄漏带来的严重后果。在此,综合阐述掺氢天然气管道泄漏扩散发展历程与国内外研究热点,分析受限与非受限空间多种场景下掺氢天然气

管道泄漏扩散研究现状,并对未来掺氢天然气管道泄漏扩散的研究方向给出建议。

1 发展历程

国际上,为了解决天然气管道掺氢相关安全问题,2002—2006年,Naturalhy项目由欧盟委员会资助启动,在不影响管网安全与不显著增加公共风险的前提下,确定了安全、合理的天然气管道掺氢比例^[12]。2008—2011年,荷兰通过Sustainable Ameland项目首次对天然气掺氢家用性能进行长期实验。2013年,美国国家可再生能源实验室发布了《天然气管道混入氢的关键技术报告》,汇总了全球范围内关于天然气掺氢研究的主要成果^[13]。2019年,法国的GRHYD示范项目对敦柯克附近的天然气管道开展掺氢测试(掺氢比20%)^[14]。截至目前,全球范围内包括德国、英国、法国、俄罗斯、荷兰及日本在内的多个国家都有天然气掺氢相关研究项目,这些研究主要集中在民用领域、工业供热及掺氢天然气对关键设备、材料、终端设备的影响等方面^[15]。欧洲作为全球最广泛应用氢能的地区,氢能产业发展势头迅猛。

中国掺氢天然气相关研究起步较晚,但发展较快。2010年,国新能源集团联合清华大学、中国氢能协会启动山西省掺氢天然气加气站项目建设^[16]。2019年,国家电投集团公司开始推进朝阳天然气掺氢示范项目,是中国首个电解制氢掺入天然气的项目。2020年,天然气掺氢关键技术研发及应用示范项目在张家口启动,该项目中掺氢天然气最终将应用于张家口市商用用户、民用用户及汽车^[17]。2023年,在宁夏

银川宁东天然气掺氢管道示范平台,天然气管道中掺氢比已逐步达到 24%,取得重大突破^[18]。2024 年,中国首座城镇燃气掺氢综合实验平台在深圳投用,实现了掺氢燃气的宽压力、长周期、规模化应用,标志着氢能应用进入全新发展阶段^[19]。

在掺氢天然气管道泄漏扩散研究方面,采用 Cite Space 文献计量软件分析 2009 年至今的研究发展历程(图 1,其中关键词出现频次由多到少共分为 15 个等级,依次由红色至浅灰色的点表示,红色的点代表在相关文献中该关键词出现频次最高;关键词出现时间是从 2009 年至 2024 年,从左往右发展)。2009 年,

研究主要聚焦于氢气与甲烷混合后的泄漏扩散规律^[20-21]。2013 年,数值模拟这一个大的聚类逐渐形成,此后相关文献数量呈指数型上涨。2014 年,国内外学者开始探究多因素耦合作用下掺氢天然气泄漏扩散规律,影响因素包括管道压力、掺氢比、通风及泄漏速度等。2015—2020 年,形成掺氢天然气泄漏扩散后浓度分布规律的综合研究聚类。2021 年之后,国内外文献数量爆发式上涨,主要通过数值模拟、小尺寸实验及理论研究方法分析掺氢天然气泄漏扩散规律。2023 年之后,大部分文献涉及掺氢天然气泄漏扩散后监/检测系统的研究与报警器的设置。

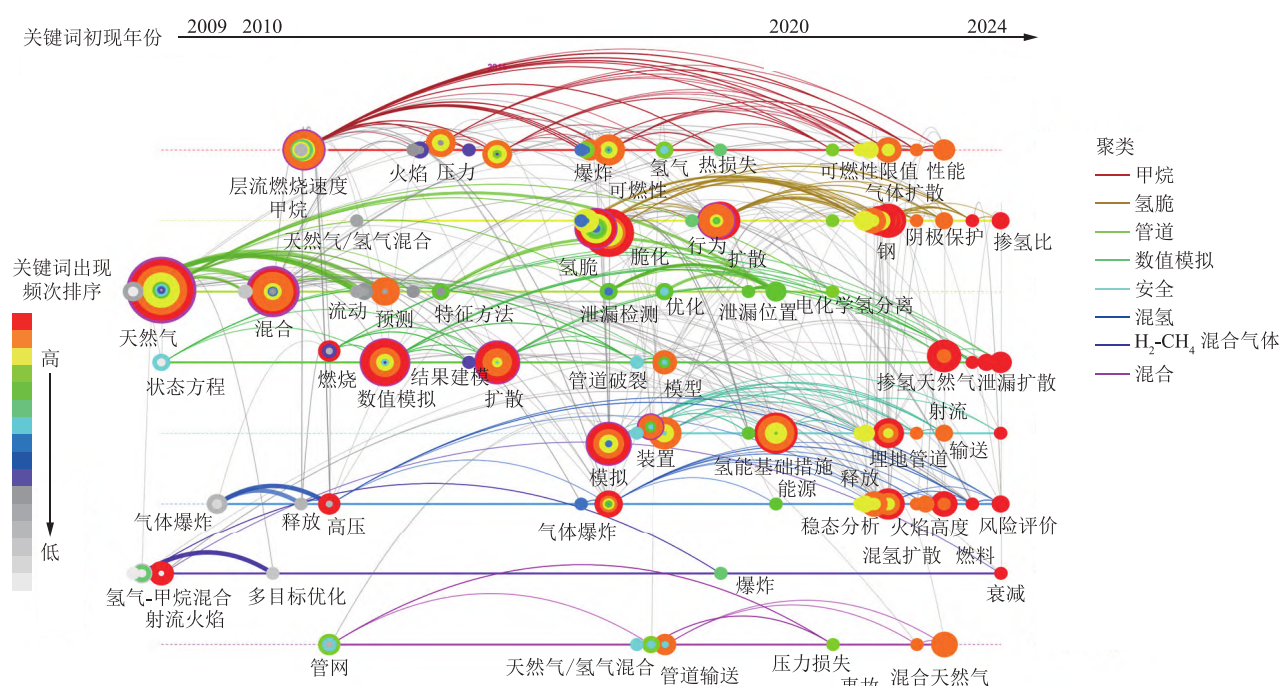


图 1 基于关键词分析的掺氢天然气泄漏扩散发展历程图

Fig. 1 Leakage and dispersion trajectories of hydrogen-blended natural gas based on keyword analysis approach

2 研究热点

掺氢天然气管道泄漏扩散环境可划分为受限空间与非受限空间,其中受限空间包括厨房餐厅(家庭环境)、站场阀室、地下管廊与隧道等,非受限空间又可分为架空管道、埋地管道及海底管道 3 类。目前,国内外掺氢天然气管道泄漏扩散研究热点主要集中在扩散浓度分布、泄漏扩散检测、泄漏模型、预测模型及报警器安装等方面(图 2,关键词出现频次由高到低呈现由红色到紫色,图中红色区域代表甲烷在掺氢天然气管道泄漏扩散相关文献中提及频次最高)。研究热点与实际应用场景紧紧相关,厨房餐厅(家庭环境)、站场阀

室、地下管廊与隧道等受限空间的相关研究热点集中于通风影响、分层现象、泄漏扩散检测及报警器安装等;在架空管道、埋地管道及海底管道掺氢输送相关研究中,研究热点聚焦于扩散浓度预测、危险云团分布、后果影响及危害半径等。

3 研究现状

3.1 受限空间

国内外学者针对厨房餐厅(家庭环境)、站场阀室、地下管廊与隧道等多种形式受限空间内掺氢天然气管道泄漏扩散规律开展了研究(表 1)。

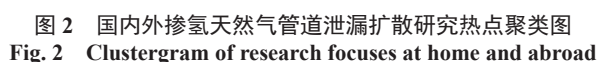


Table 1 Research on leakage and diffusion of hydrogen-blended natural gas pipelines in major confined spaces at home and abroad

858 yqcy.paperonce.org

在天然气管道中混入氢气会影响气源在家庭住宅中的使用安全性^[45],因此了解家庭环境中涉及氢气事故场景的风险变化至关重要。聚焦于泄漏过程,Hormaza Mejia^[46]通过实验研究发现氢气与甲烷在螺纹连接处的泄漏速率相同,并提出涉及分子动力学的两步泄漏机制理论,即用一条具有显著相互作用壁的曲折泄漏路径来解释氢气与天然气的泄漏速率在典型低压气体基础设施中是相同的^[47]。

在扩散阶段的研究中,Li等^[22]通过实验模拟了某家用厨房内掺氢天然气泄漏扩散事故,将整个扩散过程分为气体积聚过程与通风过程。在初始泄漏阶段,在垂直方向上,空气中的掺氢天然气体积分数随地面高度的增加而增大;在通风阶段,随着风速增大,掺氢天然气云体积迅速减小。但当风速增大至一定程度,仍难以完全使掺氢天然气气体云消散,这主要是由于缺乏对流。

在积聚阶段,许多学者^[23-27]研究了掺氢天然气的浓度分布与分层现象。Thawani等^[23-25]通过数值模拟方法,研究了受限空间掺氢天然气泄漏后氢气与甲烷的扩散行为差异:由于氢气的扩散速率较快,因此掺氢比越大,气体向下部空间的扩散速率越快;掺氢天然气静置后受限空间内会出现甲烷与氢气分层现象,在竖直方向,氢气浓度、甲烷浓度均与地面高度呈正比关系,但在顶部空间氢气的聚集程度大于甲烷。李杜^[26]开展了掺氢天然气扩散及分层实验,研究发现,在不同流量与不同气体组分工况下泄漏气体在厨房内均有明显的浓度分层现象,且泄漏量小的工况分层现象更明显;此外,还发现当内部容器与外部环境之间的温差较小时,在容器内易发生分层现象^[27]。

在通风阶段,掺氢天然气的扩散是由浮力与风的共同作用驱动的,风对掺氢天然气泄漏扩散的影响一直是研究重点。Lowesmith等^[28]搭建了一个真实实验房间对掺氢天然气在密闭空间中的泄漏、积聚行为进行研究,并开发了一个综合风力与浮力驱动的数学模型来描述气体与空气混合后的扩散过程。研究指出,由于掺氢比增大,释放到房间中的气体体积流速增加。这导致掺氢天然气浓度升高,积聚区域体积增加。然而,氢气浓度增大会导致掺氢天然气浮力增强,进而导致房间内通风气流量增加,因此也一定程度上限制了掺氢天然气浓度升高的程度。Su等^[29]利用Fluent软件对掺氢天然气在厨房中的泄漏与扩散特性进行

了数值研究。研究表明,当风速增至一定程度时,泄漏的气体很难在空旷空间积聚,这与Sun等^[30]的研究结论一致。

在站场阀室研究中,贾文龙等^[32]基于校正的Fuller模型与Fick扩散定律,建立了掺氢比0~15%的掺氢天然气多组分非理想气体扩散系数模型,修正了标准 $k-\epsilon$ 湍流模型中的组分输运方程。基于此,其进一步分析了某典型阀室与密闭压缩机工厂内掺氢天然气的泄漏扩散规律^[33]。研究表明,泄漏口朝向对掺氢天然气气体云团扩散轨迹的影响显著,气体总体按照先边界后中心的顺序扩散。当泄漏口朝向为水平方向时,气体先沿墙壁向上扩散,导致气体在墙角聚集;当泄漏口向上时,气体在顶部聚集量比泄漏口水平或朝下的工况多。俞进等^[34]研究发现,掺氢天然气爆炸下限扩散半径更小;天然气中混入氢气会导致泄漏口附近燃烧爆炸风险升高,但会减小气体扩散的危险区域范围,这是由于较低含氢量的掺氢天然气泄漏后氢气组分爆炸区域仅限于泄漏点附近。这与Li等^[35]、陈强峰等^[48]在掺氢天然气站场模拟研究中得出的结论一致,即掺氢比增大会导致泄漏点上方氢气组分爆炸区域的形成且扩大,但一定程度上限制了天然气爆炸范围向水平与垂直方向扩展。

风向是站场阀室研究中的关键影响因素,不同风速、风向下可燃气体云存在显著差异。宋玉彩等^[36]实验研究发现,当可燃气体云达到爆炸条件时,小风速场景下会产生更大的爆炸压力,事故影响范围也更广。在泄漏初期,风的存在会加速泄漏气体与空气混合形成可燃气体云;在泄漏中后期,较大的风速会加快可燃气体云弥散,这与Mei等^[37]的研究结论一致。此外,Tong等^[38]分析管道压力对站场掺氢天然气泄漏扩散后果的影响发现,在相同的泄漏条件下,管道压力增大会导致更多的掺氢天然气泄漏,从而促进易燃气体加速扩散。

在地下管廊相关研究中,由于燃气舱的空间约束,管廊内存在明显的燃爆风险,其危险性往往高于其他泄漏扩散场景。泄漏口方向与通风的相互作用对地下管廊中掺氢天然气泄漏扩散分布的影响是研究重点。段鹏飞等^[39-40]通过数值模拟方法分析管廊内掺氢比为20%的掺氢天然气管道小孔泄漏,结果得到:泄漏孔方向与孔径对掺氢天然气体积分数影响较大;当泄漏气体向通风的反方向扩散时,体积分数呈两次阶梯式下降;

泄漏气体向通风的同方向扩散时,存在第 2 个峰值。张成龙等^[41]研究表明泄漏口朝向会严重影响贴壁掺氢天然气分布,二次流近壁区的掺氢天然气积聚更加明显。

在隧道相关研究中,主要讨论机械通风与自然通风对掺氢天然气泄漏扩散的影响。Han 等^[43]利用 Fluent 软件分析了隧道内掺氢天然气泄漏扩散规律。在自然通风条件下,掺氢天然气以泄漏孔为中心向两侧对称扩散,气体会积聚在隧道顶部。与自然通风不同,正常机械通风减小了掺氢天然气的分布范围与浓度。Shao 等^[44]建立了隧道三维数值模型,对 CH₄ 与 H₂ 的扩散行为进行对比分析。结果表明, H₂ 的扩散速度更快、浓度更高,与 CH₄ 相比危险性更大。随着掺氢比增大,泄漏位置下游的掺氢天然气混合物浓度增加。当掺氢比超过 20% 时,隧道内安全风险显著增加。

可见,在受限空间发生泄漏时,容易出现掺氢天然气积聚并形成爆炸性气体混合物^[49],因此针对泄漏环境制定合适的通风策略极为重要。数值模拟方法因其准确性、安全性及可操作性,成为最普遍的掺氢天然气管道泄漏扩散研究方法。大部分文献主要分析掺氢天然气泄漏扩散过程,讨论掺氢比、风、泄漏口特征及管道压力对掺氢天然气泄漏扩散过程与浓度分布的影响,模拟计算危险范围,并设计应急通风策略与报警器的布置,但大多数模型与模拟结果缺少实验验证,且鲜有全尺寸实验。

3.2 非受限空间

国内外学者针对架空管道、埋地管道及海底管道等大量非受限空间内掺氢天然气管道泄漏扩散规律开展了研究(表 2)。

表 2 国内外主要非受限空间内掺氢天然气管道泄漏扩散研究情况表
Table 2 Research on leakage and diffusion of hydrogen-blended natural gas pipelines in major unconfined spaces at home and abroad

研究者(年份)	管道类型	软件模型	掺氢比	影响因素	研究方法
彭善碧等 ^[50] (2023 年)	架空管道	小孔泄漏、大孔泄漏	10%~30%	掺氢比、泄漏孔径、风速、大气温度	数值模拟
王鑫等 ^[51] (2023 年)	架空管道	大孔泄漏	5%~30%	环境风速、障碍物高度、掺氢比	数值模拟
孙齐等 ^[52] (2022 年)	架空管道	小孔泄漏	3%~30%	风速、掺氢比	数值模拟
Wilkening 等 ^[53] (2007 年)	高压管道	大孔泄漏	100%	风速	数值模拟
高标等 ^[54] (2023 年)	高压管道	大孔泄漏	0~20%	掺氢比、泄漏孔径、管道压力	数值模拟
Li 等 ^[55] (2024 年)	架空管道	小孔泄漏	0~30%	泄漏方向、掺氢比、泄漏孔径	数值模拟
陈俊文等 ^[56] (2024 年)	架空管道	小孔泄漏	20%	泄漏温度	数值模拟
Su 等 ^[57] (2023 年)	埋地管道	小孔泄漏、大孔泄漏	5%~20%	掺氢比、管道压力、漏孔尺寸、泄漏方向、土体类型	数值模拟
胡玮鹏等 ^[58] (2023 年)	埋地管道	小孔泄漏	0~100%	泄漏口特征、管道埋深、土壤条件、管道压力、掺氢比	数值模拟
Zhu 等 ^[59] (2023 年)	埋地管道	小孔泄漏	0~30%	掺氢比、管道压力、泄漏方向	实验研究
Liu 等 ^[60] (2024 年)	埋地管道	大孔泄漏	0~20%	压力、泄漏口尺寸、风速、掺氢比	数值模拟
Wang 等 ^[61] (2024 年)	埋地管道	大孔泄漏	0~20%	压力、泄漏口尺寸、风速、掺氢比	数值模拟
Liu 等 ^[62] (2024 年)	埋地管道	大孔泄漏	0~20%	掺氢比、土壤渗透率、风速	数值模拟
刘刚等 ^[63] (2024 年)	埋地管道	小孔泄漏、大孔泄漏	5%~30%	泄漏口特征、管道埋深、土壤孔隙率、管道压力、掺氢比	数值模拟
朱红钧等 ^[64] (2023 年)	海底管道	小孔泄漏	0~70%	海流流速、海流波长、掺氢比	数值模拟

在架空管道的研究中,风、障碍物、掺氢比、管道压力以及泄漏孔特征是影响掺氢天然气泄漏扩散规律的主要因素。彭善碧等^[50]采用 Fluent 软件建立管道二维平面泄漏扩散模型,通过单因素与多因素耦合分析对掺氢天然气泄漏扩散的影响范围进行评价。结果表明,不同因素对掺氢天然气管道泄漏扩散范围的影响程度为:泄漏孔径>风速>掺氢比>大气温度。随着风速增大,掺氢天然气在空气中的质量分数增加,且分布逐渐向下风向偏移,扩散高度减小,加速水平方向的

气体积聚,这与王鑫等^[51]的研究结论一致。Lin 等^[65]进一步研究发现,在较高的风速下,氢气体积分数分布会发生分层。可见,风速不仅影响掺氢天然气泄漏扩散范围,也改变掺氢天然气扩散轨迹与浓度分布。

在一定条件下,风与障碍物的耦合作用会促进可燃气体云积聚。王鑫等^[51]研究发现,在不改变掺氢比与风速的情况下,泄漏孔与障碍物迎风侧之间聚集的气体浓度较高,且在该区域掺氢天然气扩散面积较大;随着障碍物升高,气流沿障碍物壁面被抬升的作用明显,

水平与垂直方向扩散距离明显增大。Zhou 等^[66]利用 Fluent 软件模拟了风场条件下城市交通流对掺氢天然气泄漏扩散的影响。结果表明,由于障碍物的高拥挤程度与风的作用,气体积聚在车流附近,车与车之间的狭窄空隙加剧了可燃气体云膨胀。当风向与泄漏方向一致时,掺氢天然气由于涡流效应聚集在再循环区,会造成严重的事故后果。

由于氢气与甲烷的扩散系数不同,氢气的扩散速度更快^[53],因此探究不同掺氢比对架空掺氢天然气管道泄漏扩散后果区体积分数分布的影响一直是国内外研究热点。在国内,孙齐等^[52]研究发现,随着掺氢比增大,泄漏扩散后掺氢天然气的聚集量减少,降低了掺氢天然气气体扩散高度。在此基础上,彭善碧等^[50]、王鑫等^[51]也开展了掺氢比对掺氢天然气扩散影响研究。王鑫等^[51]研究发现随着掺氢比增大,甲烷气体云的扩散高度逐渐降低,这与彭善碧等^[50]的研究结论相反。陈俊文等^[67]分析探讨了典型情景下掺氢天然气的安全相关特性。研究表明,随着掺氢比增大,掺氢天然气的热辐射面积与潜在影响半径减小,而泄漏体积流量、泄漏扩散范围及可燃气体检查指数均有所增加。在国外,Shirvill 等^[68]利用相互连接的管道搭建实验平台,开展 $\text{CH}_4\text{-H}_2$ 混合物点燃产生的爆炸超压测量实验,对掺氢比的安全范围进行定量评价,发现在管道中增加体积分数小于 25% 的氢气不会显著增大爆炸风险。

管道泄漏源类型对掺氢天然气泄漏扩散危险区分布的影响仍是掺氢天然气泄漏事故研究重点。Li 等^[55]通过数值模拟方法,对比不同管道泄漏源释放的掺氢天然气流场分布差异,基于反向传播神经网络(Back Propagation Neural Network, BPNN)建立多因素耦合下 3 种管道泄漏源中掺氢天然气最大水平扩散距离的预测模型。结果表明,在相同工况下,管道内气体流动方向与泄漏孔法线夹角以及阶跃流动均会导致泄漏孔附近浓度场存在差异,水平管道端释放的气体浓度衰减速率大于垂直管道释放的气体浓度衰减速率。

关键参数受温度影响的变化规律及其潜在安全影响是开展掺氢管道精细化工程设计的支撑。陈俊文等^[56]从热力学角度出发,通过理论分析、数值模拟探究了温度对掺氢天然气泄漏扩散的影响。研究表明,低温将提高泄漏质量流量,并扩大水平泄漏后的扩散影响范围。

在埋地掺氢天然气管道泄漏扩散规律的研究中,

埋深、土壤条件、掺氢比、管道压力及泄漏孔特征是主要研究因素。Su 等^[57]指出不同因素对埋地掺氢天然气管道泄漏扩散的影响程度排序是:土体类型>管道运行压力>泄漏孔径>泄漏方向>掺氢比,即土壤渗透率与埋深对埋地掺氢天然气泄漏扩散的影响极为关键。刘刚等^[63]研究发现,当其他影响因素一定时,不同类型土壤工况下掺氢天然气含量与扩散范围从大到小为纯砂土>纯壤土>纯黏土,同时扩散半径与覆土厚度呈负相关关系。土壤的渗透率越大、埋深越浅,掺氢天然气扩散速度越快^[58,62]。相比传统的管道-土壤-大气整体建模,Liu 等^[62]基于有限体积法与有限差分法,分别建立埋地掺氢天然气管道泄漏模型、地下渗漏模型及地上区域扩散模型,讨论了埋地掺氢天然气管道渗漏后压力、体积、温度参数的瞬态变化、连续渗流气体在土壤中流动、气体向地面渗透及其在大气中扩散的全过程,实现了管道流-渗流-扩散模型的耦合分析。

众多学者针对泄漏口特征与管道压力对埋地掺氢天然气管道泄漏扩散的影响开展了实验、数值模拟研究。研究表明,埋地掺氢天然气管道泄漏扩散的垂直、水平范围均与泄漏孔尺寸、压力正相关^[59-60],泄漏口位置主要影响掺氢天然气云团的分布^[63]。

此外,掺氢比对掺氢天然气泄漏率与扩散后掺氢天然气浓度分布的影响也是研究重点。在数值模拟方面,胡玮鹏等^[57-58,60-61,69]建立埋地管道的泄漏扩散模型,分析不同掺氢比对泄漏扩散特性的影响。随着掺氢比增大,掺氢天然气云团扩散高度增加,危险范围也增大。在实验研究方面,Houssin-agbomson 等^[70]建立全尺寸实验模拟 12 mm 裂缝下埋地高压管道泄漏过程,发现土壤坑的形成与管道压力、泄漏口方向及土壤类型有关,与泄漏气体性质无关。在埋地掺氢天然气输送管道中,氢气与甲烷的泄漏率相同^[71]。Zhu 等^[59]搭建一套全尺寸掺氢天然气地下管道泄漏扩散实验系统,研究表明,氢气的扩散系数较甲烷大,氢气携带甲烷扩散,缩短了甲烷的饱和时间。

目前,国内外关于海底管道掺氢输送研究较少。朱红钧等^[64]利用 Fluent 软件,数值模拟了波流联合作用下掺氢输气海管泄漏扩散的过程。结果表明,气体泄漏的过程可分为泄漏初期、向上浮升以及横向迁移 3 个阶段。随着掺氢比与浮升高度的增加,天然气泡与氢气泡的上升速度都呈现先增大后减小的趋势,且氢气泡的上升速度更大。当掺氢比小于 50% 时,氢气

泡的运动轨迹受天然气泡的影响显著;波长与海流流速越大,泄漏气体的扩散直径越大。

综上,除掺氢比、管道压力及泄漏孔特征等因素以外,3种类型的管道各有研究侧重点:对于架空管道,主要分析风与障碍物耦合作用对泄漏气体聚集与扩散的影响;对于埋地管道,主要探究土壤条件对掺氢天然气扩散的影响;对于海底管道,主要分析波长与海流速度对掺氢天然气扩散轨迹的影响。

4 未来研究方向

中国天然气掺氢产业起步较晚,虽已布局多项示范性项目,但多数项目仍处于前期研究阶段,相关技术指标与成果较少且缺乏系统性梳理^[72-73]。其次,存在输配网配氢的技术限制,如催化、泄漏、压力损失及材料相容性等^[73-75]。因此,掺氢天然气运输的安全性研究是推进掺氢行业发展的重点,结合相关研究成果与行业趋势,对掺氢天然气输送未来研究方向提出以下建议:

1) 基于全尺寸实验的多场耦合掺氢天然气泄漏扩散规律研究。掺氢天然气管道泄漏扩散后果主要受管道本体、环境及混合气体性质等多因素的影响,然而当前研究大多局限于小尺寸、影响因素简化的泄漏扩散实验与数值模拟,且部分模型缺乏实验验证,模拟结果的准确性无从考证。因此应加强开展全尺寸的实验研究,将影响因素与实际环境贴合,考虑天然气管材、工况的差异,将模拟结果推广至更复杂的应用场合,为特定情景下的危险范围判定与应急处置提供技术依据。

2) 水下及高压掺氢天然气管道泄漏扩散规律研究。近年来,中国长距离输氢技术取得突破^[76],且随着穿跨越河流、海底及高压管道迅速发展^[77],掺氢管道将涉及多场景输送,但关于水下掺氢天然气管道的泄漏扩散研究鲜有涉及。此外,一般认为4 MPa以下的管道掺氢比例可达30%~40%^[4],但高压管道掺氢研究尚不成熟,缺乏相关掺氢标准,亟待进一步推进水下及高压掺氢管道安全性相关实验与研究。目前研究应结合水下及高压实际运行环境,得出科学安全的掺氢比例,为制定相应标准提供理论依据。

3) 掺氢天然气管道泄漏扩散监/检测技术研究。根据不同场景,对气体泄漏检测系统与设备进行优化设计,提高泄漏气体检测的敏感性,仍是目前的技术

难题。一般的管道计算检测(Computational Pipeline Monitoring, CPM)方法仅适用于掺氢比较小的泄漏工况。Cristello等^[78]针对掺氢天然气泄漏监测问题开发了一个实时瞬态模型(Real Time Transient Model, RTTM),以解决当前基于CPM的泄漏检测方法与掺氢天然气的兼容性问题。采用RTTM模拟管道压力与流量,将模拟数据与实际传感器数据进行对比,以识别泄漏。但RTTM模型相对简单,无法直接适用于复杂的现实管道网络。因此需结合氢气与天然气的理化性质,进一步探究不同掺氢比下管道及关键设备气体泄漏、积聚、燃烧、爆炸特点与演化规律,针对性提高特定应用场景下的气体监检测技术,为制定具体的防范应急措施提供依据。

4) 掺氢天然气管道泄漏扩散的定量风险评估与安全评价方法研究。美国天然气工艺研究院(Gas Technology Institute, GTI)提出一套定量风险评估的方法,分析不同因素对天然气掺氢输送系统风险的影响^[79]。该风险评估方法基于美国天然气系统的基础数据,聚焦于掺氢比对整体管网输送安全的影响,但尚未形成完整的掺氢天然气泄漏扩散后的定量风险评估方法。可借鉴现有天然气管道相关方案与方法,探索掺氢天然气管道泄漏扩散的量化风险评估与安全评价方法^[80],实施适合掺氢天然气管道输送的完整性管理方案^[81],建立全面、多层次的管道安全防护屏障,有利于推动制定掺氢天然气管道安全运行标准规范,为实现掺氢天然气大规模输送提供技术参考。

5 结束语

对掺氢天然气管道泄漏扩散发展历程、研究热点以及研究现状进行了大量的文献调查与阐述,分析讨论了未来研究方向。根据现有的研究结果,得出以下结论:

1) 掺氢天然气泄漏扩散相关研究方法主要依托于数值模拟,全尺寸实验平台的搭建仍需完善,基于分子动力学的理论研究较少。大多实验和模拟参数进行了简化与假设,实验与管道实际运行情况贴合度较低,掺氢天然气管道泄漏扩散后的危险范围与应急处理方案的制定缺乏技术支持。

2) 目前缺乏部分典型用氢环境的模拟研究,水下及高压掺氢天然气管道泄漏扩散研究开展较少。大部分研究集中于管道小孔泄漏与完全断裂的泄漏情景,

尚缺乏掺氢天然气在螺纹接头、法兰等连接位置存在的微隙渗漏相关机理研究。

3) 掺氢天然气的安全定量评价是其工程应用的重要前提与保障,掺氢天然气管道泄漏扩散检测技术研究亟需深入。鉴于事故数据与实验数据欠缺,未来可通过机理仿真模型与数据驱动模型相结合建立更可靠的风险评价方法。

参考文献:

- [1] 左凯文. “双碳”背景下, 天然气行业发展前景探索[C]. 上海: 2023 年中国城市燃气协会标准工作委员会年会暨燃气安全运营和智慧建设研讨会论文集, 2023: 258-261.
- ZUO K W. Exploration on the development prospect of natural gas industry under the background of “dual carbon”[C]. Shanghai: 2023 Annual Meeting of China City Gas Association Standards Working Committee and Gas Safety Operation and Smart Construction Seminar, 2023: 258-261.
- [2] 陈石义, 龙海洋, 李天雷, 廖勇, 刘武. 天然气管道掺氢探讨[J]. 天然气与石油, 2020, 38(6): 22-26. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2020.06.004.
- CHEN S Y, LONG H Y, LI T L, LIAO Y, LIU W. Discussion on blending hydrogen into natural gas pipeline networks[J]. Natural Gas and Oil, 2020, 38(6): 22-26.
- [3] FIELD R A, DERWENT R G. Global warming consequences of replacing natural gas with hydrogen in the domestic energy sectors of future low-carbon economies in the United Kingdom and the United States of America[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(58): 30190-30203. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.06.120.
- [4] 朱兴珊, 沈学思. 从天然气到氢: 中国新型能源体系的演化[J]. 国际石油经济, 2023, 31(8): 1-15. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7298.2023.08.001.
- ZHU X S, SHEN X S. From natural gas to hydrogen: the evolution of the new energy system in China[J]. International Petroleum Economics, 2023, 31(8): 1-15.
- [5] 刘京京, 李志军, 何宏凯. 天然气掺氢技术发展现状及相关标准体系[J]. 上海煤气, 2022(1): 28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4709.2022.01.008.
- LIU J J, LI Z J, HE H K. Development status and related standard system of natural gas hydrogen blending technology[J]. Shanghai Gas, 2022(1): 28-31.
- [6] 梁平, 夏志伟, 王飞, 王大庆. 天然气管道掺氢探讨[C]. 南京: 2022 年中国城市燃气协会标准工作委员会年会暨聚焦燃气安全赋能创新发展标准化论坛获奖论文集, 2022: 29-33.
- LIANG P, XIA Z W, WANG F, WANG D Q. Discussion on hydrogen blending in natural gas pipelines[C]. Nanjing: Award winning proceedings of 2022 Annual Meeting of Standards Working Committee of China City Gas Association and Standardization Forum Focusing on Gas Safety Enabling Innovation and Development, 2022: 29-33.
- [7] GALYAS A B, KIS L, TIHANYI L, SZUNYOG I, VADASZI M, KONCZ A. Effect of hydrogen blending on the energy capacity of natural gas transmission networks[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(39): 14795-14807. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.12.198.
- [8] JIA G W, LEI M Y, LI M Y, XU W Q, LI R, LU Y H, et al. Hydrogen embrittlement in hydrogen-blended natural gas transportation systems: A review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(82): 32137-32157. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.04.266.
- [9] 王珂. 天然气掺氢燃烧特性研究[D]. 荆州: 长江大学, 2021.
- WANG K. Research on combustion characteristics of natural gas mixed with hydrogen[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2021.
- [10] SHEN X B, XIU G L, WU S Z. Experimental study on the explosion characteristics of methane/air mixtures with hydrogen addition[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 120: 741-747. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.04.040.
- [11] ASKAR E, SCHRÖDER V, SCHÜTZ S, SEEMANN A. Power-to-gas: safety characteristics of hydrogen/natural gas mixtures[J]. Chemical Engineering Transactions, 2016, 48: 397-402. DOI: 10.3303/CET1648067.
- [12] SHIRVILL L C, ROBERTS T A, ROYLE M, WILLOUGHBY D B, SATHIAH P. Experimental study of hydrogen explosion in repeated pipe congestion: Part 2: Effects of increase in hydrogen concentration in hydrogen-methane-air mixture[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(5): 3264-3276. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.021.
- [13] MELAINA M W, ANTONIA O, PENEV M. Blending hydrogen into natural gas pipeline networks: a review of key issues: NREL/TP-5600-51995[R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2013:1-13.
- [14] MAHAJAN D, TAN K, VENKATESH T, KILETI P,

- CLAYTON C R. Hydrogen blending in gas pipeline networks: a review[J]. *Energies*, 2022, 15(10): 3582. DOI: 10.3390/en15103582.
- [15] 沈丹丹, 姚才华, 刘京京. 碳中和背景下天然气掺氢应用与关键技术研究[J]. *上海节能*, 2022(3): 277-282. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2022.03.006.
- SHEN D D, YAO C H, LIU J J. Application and key technology research on HCNG under background of carbon neutrality[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2022(3): 277-282.
- [16] 尚娟, 鲁仰辉, 郑津洋, 孙晨, 花争立, 于文涛, 等. 掺氢天然气管道输送研究进展和挑战[J]. *化工进展*, 2021, 40(10): 5499-5505. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2020-2140.
- SHANG J, LU Y H, ZHENG J Y, SUN C, HUA Z L, YU W T, et al. Research status-in-situ and key challenges in pipeline transportation of hydrogen-natural gas mixtures[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(10): 5499-5505.
- [17] 任若轩, 游双娇, 朱新宇, 岳小文, 姜振超. 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. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2021.03.006.
- REN R X, YOU S J, ZHU X Y, YUE X W, JIANG Z C. Development status and prospects of hydrogen compressed natural gas transportation technology[J]. *Petroleum and New Energy*, 2021, 33(4): 26-32.
- [18] 佚名. 我国长距离输氢技术获突破 掺氢比例达 24%[J]. *上海节能*, 2023(4): 467.
- Anon. China's long-distance hydrogen transport technology has achieved a breakthrough in hydrogen mixing ratio of 24%[J]. *Shanghai Energy Conservation*, 2023(4): 467.
- [19] 佚名. 我国首座城镇燃气掺氢综合实验平台投产[J]. *焊管*, 2024, 47(1): 38.
- Anon. China's first urban gas hydrogen mixing comprehensive experimental platform put into operation[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2024, 47(1): 38.
- [20] STUDER E, JAMOIS D, JALLAIS S, LEROY G, HEBRARD J, BLANCHETIÈRE V. Properties of large-scale methane/hydrogen jet fires[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(23): 9611-9619. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.09.024.
- [21] 刘延雷. 高压氢气快充温升控制及泄漏扩散规律研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2009.
- LIU Y L. Investigation on control of temperature rise in fast filling of high pressure hydrogen and diffusion due to its leakage[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [22] LI M H, CHEN S Q, JIANG W D, LI Y C, XU Z, GUAN B, et al. Numerical simulation analysis of the hydrogen-blended natural gas leakage and ventilation processes in a domestic house[J]. *ACS Omega*, 2023, 8(38): 34610-34628. DOI: 10.1021/acsomega.3c03551.
- [23] THAWANI B, HAZAEL R, CRITCHLEY R. Numerical modelling of hydrogen leakages in confined spaces for domestic applications[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 56: 797-806. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.279.
- [24] 李苒苒, 刘振翼, 李鹏亮. 室内掺氢天然气泄漏分层现象模拟研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2023, 19(9): 129-135. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2023.09.019.
- LI R R, LIU Z Y, LI P L. Simulation study on stratification phenomenon of indoor hydrogen-blended natural gas leakage[J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2023, 19(9): 129-135.
- [25] LI H, CAO X W, DU H M, TENG L, SHAO Y B, BIAN J. Numerical simulation of leakage and diffusion distribution of natural gas and hydrogen mixtures in a closed container[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(84): 35928-35939. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.142.
- [26] 李杜. 典型受限空间掺氢天然气泄漏爆炸后果评估[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- LI D. Assessment of the consequences of hydrogen mixed natural gas leakage and explosion in typical confined spaces[D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.
- [27] MARANGON A, CARCASSI M N. Hydrogen-methane mixtures: dispersion and stratification studies[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(11): 6160-6168. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.10.159.
- [28] LOWESMITH B J, HANKINSON G, SPATARU C, STOBART M. Gas build-up in a domestic property following releases of methane/hydrogen mixtures[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34(14): 5932-5939. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.01.060.
- [29] SU Y, LI J F, YU B, ZHAO Y L. Numerical investigation on the leakage and diffusion characteristics of hydrogen-blended natural gas in a domestic kitchen[J]. *Renewable Energy*, 2022, 189: 899-916. DOI: 10.1016/j.renene.2022.03.038.
- [30] SUN R F, PU L, HE Y C, YAN T T, TAN H B, LEI G, et al. Investigation of the leakage and diffusion characteristics of hydrogen-addition natural gas from indoor pipelines[J].

- International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(98): 38922–38934. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.204.
- [31] 李亮, 臧子璇, 漆琦, 李杜, 黄小美. 临街餐厅掺氢天然气泄漏爆炸模拟研究[J]. 煤气与热力, 2022, 42(5): 33–38. DOI: 10.13608/j.cnki.1000-4416.2022.05.017.
- LI L, ZANG Z, QI Q, LI D, HUANG X M. Simulation of hydrogen gas leakage and explosion in street restaurant[J]. Gas & Heat, 2022, 42(5): 33–38.
- [32] 贾文龙, 温川贤, 杨明, 黄军, 吴瑕, 李长俊. 掺氢天然气输送管道阀室泄漏扩散规律研究[J]. 油气与新能源, 2021, 33(6): 75–82. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2021.05.014.
- JIA W L, WEN C X, YANG M, HUANG J, WU X, LI C J. Study on leakage and diffusion of hydrogen mixed natural gas in the valve chamber[J]. Petroleum and New Energy, 2021, 33(6): 75–82.
- [33] JIA W L, REN Q Y, ZHANG H, YANG M, WU X, LI C J. Multicomponent leakage and diffusion simulation of natural gas/hydrogen mixtures in compressor plants[J]. Safety Science, 2023, 157: 105916. DOI: 10.1016/j.ssci.2022.105916.
- [34] 俞进, 张皓, 贾文龙, 谢萍, 李长俊. 混氢天然气输气站场泄漏扩散数值模拟[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2022, 44(6): 153–161. DOI: 10.11885/j.issn.1674-5086.2020.09.24.03.
- YU J, ZHANG H, JIA W L, XIE P, LI C J. Numerical simulation of leakage and diffusion in hydrogen mixed natural gas transmission station[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2022, 44(6): 153–161.
- [35] LI X H, JIA M R, ZHANG R R, HAN Z Y. Dispersion modeling and assessment of natural gas containing hydrogen released from a damaged gas transmission pipeline[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(83): 35365–35385. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.08.104.
- [36] 宋玉彩, 滕卫明, 陈强峰, 帅健, 李云涛, 王西明, 等. 风速条件下掺氢天然气站场泄漏爆炸后果[J]. 油气与新能源, 2023, 35(5): 66–73. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2023.05.010.
- SONG Y C, TENG W M, CHEN Q F, SHUAI J, LI Y T, WANG X M, et al. Explosion consequence of hydrogen natural gas station under wind speed condition[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(5): 66–73.
- [37] MEI Y, SHUAI J, LI Y T. Analysis of the consequences of hydrogen-blended natural gas leakage accidents[J/OL]. Combustion Science and Technology: 1–24[2024-03-20]. <https://doi.org/10.1080/00102202.2023.2230517>. DOI: 10.1080/00102202.2023.2230517.
- [38] TONG S R, LI X, DING H R, SHUAI J, MEI Y, CHAN S H. Large-scale transient simulation for consequence analysis of hydrogen-doped natural gas leakage and explosion accidents[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 54: 864–877. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.088.
- [39] 段鹏飞, 张进盛, 常曦文, 韩辉, 刘翠伟, 刘建辉, 等. 掺氢天然气在管廊中的泄漏扩散特性[J]. 油气储运, 2023, 42(8): 901–909. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.08.006.
- DUAN P F, ZHANG J S, CHANG X W, HAN H, LIU C W, LIU J H, et al. Leakage and diffusion characteristics of hydrogen enriched natural gas in utility tunnel[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(8): 901–909.
- [40] 段鹏飞, 常曦文, 李璐伶, 刘建辉, 李玉星. 掺氢天然气在管廊中的泄漏与报警器响应[J]. 化学工程, 2023, 51(8): 84–88. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9954.2023.08.016.
- DUAN P F, CHANG X W, LI L L, LIU J H, LI Y X. Leakage and alarm response of hydrogen-blended NG in utility tunnel[J]. Chemical Engineering, 2023, 51(8): 84–88.
- [41] 张成龙, 李俊磊, 张永海, 李璐玲, 段鹏飞, 魏进家. 综合管廊中掺氢天然气泄漏安全性分析[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(2): 22–30. DOI: 10.7652/xjtub202402003.
- ZHANG C L, LI J L, ZHANG Y H, LI L L, DUAN P F, WEI J J. Safety analysis of hydrogen-blended natural gas leakage in comprehensive pipe gallery[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2024, 58(2): 22–30.
- [42] WANG K, LI C J, JIA W L, CHEN Y, WANG J. Study on multicomponent leakage and diffusion characteristics of hydrogen-blended natural gas in utility tunnels[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50(Part A): 740–760. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.262.
- [43] HAN H, CHANG X W, DUAN P F, LI Y X, ZHU J L, KONG Y Y. Study on the leakage and diffusion behavior of hydrogen-blended natural gas in utility tunnels[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 85: 105151. DOI: 10.1016/j.jlp.2023.105151.
- [44] SHAO X Y, YANG S Y, YUAN Y L, JIA H L, ZHENG L G, LIANG C P. Study on the difference of dispersion behavior between hydrogen and methane in utility tunnel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(12): 105151–105161. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.105151.

- 8130-8144. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.12.123.
- [45] 马向阳, 黄小美, 吴嫦. 天然气掺氢对家用燃气灶燃烧特性的影响研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(12): 1746-1751. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2018.12.002.
- MA X Y, HUANG X M, WU C. Study on the influence of natural gas hydrogenation on combustion characteristics of domestic gas cooker[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(12): 1746-1751.
- [46] HORMAZA MEJIA N A. Experimental investigation of hydrogen and hydrogen/methane mixture leakage from low-pressure natural gas infrastructure[D]. Irvine: University of California, Irvine, 2019.
- [47] HORMAZA MEJIA A, BROUWER J, MAC KINNON M. Hydrogen leaks at the same rate as natural gas in typical low-pressure gas infrastructure[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(15): 8810-8826. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.12.159.
- [48] 陈强峰, 王西明, 汤敏华, 李想. 基于FLACS的掺氢燃气站场事故后果评估[J]. 消防科学与技术, 2022, 41(7): 937-941. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0029.2022.07.013.
- CHEN Q F, WANG X M, TANG M H, LI X. Accident consequence assessment of hydrogen-doped gas station based on FLACS[J]. Fire Science and Technology, 2022, 41(7): 937-941.
- [49] 马青峰, 韩辉, 李玉星, 孔莹莹, 刘翠伟, 常曦文, 等. 受限空间掺氢天然气泄漏与燃爆特性研究综述[J]. 油气与新能源, 2023, 35(1): 117-128. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2023.01.015.
- MA Q F, HAN H, LI Y X, KONG Y Y, LIU C W, CHANG X W, et al. Research summary of the leakage, combustion and explosion characteristics concerning hydrogen enriched compressed natural gas (HCNG) in confined space[J]. Petroleum and New Energy, 2023, 35(1): 117-128.
- [50] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1007-3426.2023.06.007.
- PENG S B, LUO X, YANG L. Numerical simulation of leakage and diffusion rules of hydrogen blended natural gas long-distance transportation pipelines[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2023, 52(6): 44-52, 59.
- [51] 王鑫, 许鸿云, 陈铎, 赵子瑶, 黄雨, 任帅, 等. 障碍物影响下的掺氢天然气管道泄漏扩散行为研究[J]. 化工安全与环境, 2023, 36(7): 12-21.
- WANG X, XU H Y, CHEN D, ZHAO Z Y, HUANG Y, REN S, et al. Study on leakage and diffusion behavior of hydrogen-doped natural gas pipeline under the influence of obstacles[J]. Chemical Safety and Environment, 2023, 36(7): 12-21.
- [52] 孙齐, 李凤, 王一玮, 董绍华, 陈林, 张行. 掺氢天然气管道泄漏扩散规律及监测探头布设方案[J]. 油气储运, 2022, 41(8): 916-923. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.08.006.
- SUN Q, LI F, WANG Y W, DONG S H, CHEN L, ZHANG H. Leakage diffusion law of hydrogen-mixed natural gas pipeline and layout plan of detectors[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(8): 916-923.
- [53] WILKENING H, BARALDI D. CFD modelling of accidental hydrogen release from pipelines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(13): 2206-2215. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2007.04.022.
- [54] 高标, 赵若彤, 邹楚婷, 胡梦玉, 王国付. 高压掺氢天然气管道泄漏扩散与失效后果的数值模拟研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2023, 43(2): 60-66. DOI: 10.12422/j.issn.1672-6952.2023.02.010.
- GAO B, ZHAO R T, KUAI C T, HU M Y, WANG G F. Numerical simulation of leak diffusion and failure consequences of high-pressure hydrogen-doped natural gas pipelines[J]. Journal of Liaoning Petrochemical University, 2023, 43(2): 60-66.
- [55] LI Y J, WANG Z R, SHANG Z. Analysis and prediction of hydrogen-blended natural gas diffusion from various pipeline leakage sources based on CFD and ANN approach[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 53: 535-549. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.12.018.
- [56] 陈俊文, 任立新, 汤晓勇, 陈凤, 李天雷, 王静, 等. 基于热力学影响的氢气与掺氢天然气管道工艺安全问题探讨[J]. 天然气与石油, 2024, 42(2): 47-54. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2024.02.007.
- CHEN J W, REN L X, TANG X Y, CHEN F, LI T L, WANG J, et al. Discussion on the process safety issues of hydrogen and hydrogen-blended natural gas pipelines based on the law of thermodynamics[J]. Natural Gas and Oil, 2024, 42(2): 47-54.
- [57] SU Y, LI J F, YU B, ZHAO Y L, HAN D X, SUN D L. Modeling of hydrogen blending on the leakage and diffusion of urban buried hydrogen-enriched natural gas pipeline[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2023, 136(2): 1315-1337. DOI: 10.32604/cmes.2023.026035.

- [58] 胡玮鹏,陈光,齐宝金,张永海. 埋地纯氢/掺氢天然气管道泄漏扩散数值模拟[J]. 油气储运, 2023, 42(10): 1118-1127, 1136. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.10.005.
- HU W P, CHEN G, QI B J, ZHANG Y H. Numerical simulation of leakage and diffusion of buried pure hydrogen/hydrogen-doped natural gas pipeline[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(10): 1118-1127, 1136.
- [59] ZHU J L, PAN J, ZHANG Y X, LI Y X, LI H, FENG H, et al. Leakage and diffusion behavior of a buried pipeline of hydrogen-blended natural gas[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(30): 11592-11610. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.185.
- [60] LIU W, LI L D, ZHAO D H, LIAO Y. Study on the leakage and diffusion characteristics of buried hydrogen-blended natural gas pipelines[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2024, 146(1): 011001. DOI: 10.1115/1.4064204.
- [61] WANG L, CHEN J, MA T X, MA R L, BAO Y Y, FAN Z Y. Numerical study of leakage characteristics of hydrogen-blended natural gas in buried pipelines[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 49(Part D): 1166-1179. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.293.
- [62] LIU X, WANG Y, LIANG Y J, LI J F. CFD analysis of leakage and diffusion characteristics in the buried hydrogen-blended natural gas pipeline[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 60: 354-368. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2024.02.092.
- [63] 刘刚,王鑫,陈铎,黄镜溢,班久庆,杨威. 土壤性质对掺氢天然气管道泄漏规律的影响[J/OL]. 石油与天然气化工: 1-15[2024-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1210.TE.20240325.1606.002.html>.
- LIU G, WANG X, CHEN D, HUANG J Y, BAN J Q, YANG W. Effect of soil properties on leakage law of hydrogen-doped natural gas pipeline[J/OL]. Chemical Engineering of Oil & Gas: 1-15[2024-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1210.TE.20240325.1606.002.html>.
- [64] 朱红钧,黄栏,高岳,唐堂. 波流联合作用下掺氢输气海管泄漏扩散研究[J/OL]. 海洋工程: 1-15[2024-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1423.P.20230914.1932.004.html>.
- ZHU H J, HUANG L, GAO Y, TANG T. Study on leakage and diffusion of hydrogen-doped gas pipeline under the combined action of wave and current[J/OL]. The Ocean Engineering: 1-15[2024-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1423.P.20230914.1932.004.html>.
- [65] LIN Y J, LING X D, YU A F, LIU Y, LIU D, WANG Y Z, et al. Modeling of hydrogen dispersion, jet fires and explosions caused by hydrogen pipeline leakage[J]. Fire, 2024, 7(1): 8. DOI: 10.3390/fire7010008.
- [66] ZHOU C L, YANG Z, CHEN G H, ZHANG Q, YANG Y H. Study on leakage and explosion consequence for hydrogen blended natural gas in urban distribution networks[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(63): 27096-27115. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.06.064.
- [67] 陈俊文,汤晓勇,陈情来,陶科宇,谌贵宇,李天雷. 天然气掺氢对管输工艺安全影响的探讨[J]. 天然气与石油, 2022, 40(4): 16-22. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2022.04.002.
- CHEN J W, TANG X Y, CHEN Q L, TAO K Y, SHEN G Y, LI T L. Study on the impact of hydrogen-blended natural gas on process safety of pipeline transmission[J]. Natural Gas and Oil, 2022, 40(4): 16-22.
- [68] SHIRVILL L C, ROBERTS T A, ROYLE M, WILLOUGHBY D B, SATHIAH P. Experimental study of hydrogen explosion in repeated pipe congestion: Part 2: effects of increase in hydrogen concentration in hydrogen-methane-air mixture[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(5): 3264-3276. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2018.12.021.
- [69] 刘延雷,徐平,郑津洋,赵永志,陈虹港,邓贵德,等. 管道输运高压氢气与天然气的泄漏扩散数值模拟[J]. 太阳能学报, 2008, 29(10): 1252-1255. DOI: 10.3321/j.issn:0254-0096.2008.10.013.
- LIU Y L, XU P, ZHENG J Y, ZHAO Y Z, CHEN H G, DENG G D, et al. Numerical simulation on the dispersion of hydrogen and natural gas due to high pressured pipeline leakage[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2008, 29(10): 1252-1255.
- [70] HOUSSIN-AGBOMSON D, BLANCHETIÈRE G, MCCOLLUM D, SAINT-MACARY C, MENDES R F, JAMOIS D, et al. Consequences of a 12 mm diameter high pressure gas release on a buried pipeline. Experimental setup and results[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2018, 54: 183-189. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.03.016.
- [71] LI J, SONG F M, ZHANG X Q. A review on hazards and risks to pipeline operation under transporting hydrogen energy and hydrogen-mixed natural gas[J]. Science and Technology for Energy Transition, 2024, 79: 9. DOI: 10.2516/stet/2024004.

- [72] 高岳, 朱红钧, 唐堂, 李佳男, 陈泉宇, 刘文丽. 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. DOI: 10.12434/j.issn.2097-2547.20230260.
- GAO Y, ZHU H J, TANG T, LI J N, CHEN Q Y, LIU W L. 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.
- [73] 张家俊, 国丽萍. 氢能管道输送技术最新进展[J/OL]. 化工进展: 1-9[2024-03-20]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2164>. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2164.
- ZHANG J J, GUO L P. The latest progress of hydrogen energy pipeline transportation technology[J/OL]. Chemical Industry and Engineering Progress: 1-9[2024-03-20]. <https://doi.org/10.16085/j.issn.1000-6613.2023-2164>.
- [74] ERDENER B C, SERGI B, GUERRA O J, LAZARO CHUECA A, PAMBOUR K, BRANCUCCI C, 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. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2022.10.254.
- [75] 赵茜, 邢云颖, 王修云, 杨芝乐, 张雷. 天然气管道掺氢输送相容性研究现状[J/OL]. 材料导报: 1-15[2024-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20231024.1756.002.html>.
- ZHAO Q, XING Y Y, WANG X Y, YANG Z L, ZHANG L. Research status of compatibility of hydrogen doped natural gas pipeline[J/OL]. Materials Reports: 1-15[2024-03-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20231024.1756.002.html>.
- [76] 佚名. 中石油天然气管道长距离输氢技术获突破[J]. 氯碱工业, 2023, 59(5): 45.
- Anon. Breakthrough in long-distance hydrogen transport technology of petrochina natural gas pipeline[J]. Chlor-Alkali Industry, 2023, 59(5): 45.
- [77] 佚名. 国内首条掺氢高压输气管道工程开工建设[J]. 焊管, 2023, 46(3): 19.
- Anon. The construction of the first hydrogen doped high-pressure gas transmission pipeline in China started[J]. Welded Pipe and Tube, 2023, 46(3): 19.
- [78] CRISTELLO J B, YANG J M, HUGO R, LEE Y, PARK S S. Feasibility analysis of blending hydrogen into natural gas networks[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(46): 17605-17629. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.01.156.
- [79] 谢萍, 伍奕, 李长俊, 贾文龙, 张皓, 吴瑕. 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. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2021.04.001.
- XIE P, WU Y, LI C J, JIA W L, ZHANG H, WU X. Research progress on pipeline transportation technology of hydrogen-mixed natural gas[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(4): 361-370.
- [80] 李茜璐, 唐柳怡. 混氢天然气在终端管网中应用的研究进展[J]. 油气储运, 2022, 41(4): 381-390. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2022.04.003.
- LI Q L, TANG L Y. Research progress on application of hydrogen-mixed natural gas in terminal pipe network[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2022, 41(4): 381-390.
- [81] 单克, 段鹏飞, 金友平, 杨光, 刘建辉. 掺氢燃气管道完整性管理的关键技术[J]. 油气储运, 2023, 42(8): 894-900. DOI: 10.6047/j.issn.1000-8241.2023.08.005.
- SHAN K, DUAN P F, JIN Y P, YANG G, LIU J H. Key technologies for integrity management of hydrogen-blended gas pipelines[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2023, 42(8): 894-900.

(编辑: 刘朝阳)

基金项目: 国家自然科学基金项目“X80 掺氢天然气管道环焊缝区微结构-应力-氢协同效应与氢脆失效机理多尺度研究”, 52374068。

作者简介: 蒋宏业, 男, 1974 年生, 副教授, 2004 年硕士毕业于西南石油大学油气储运工程专业, 现主要从事油气储运系统安全与完整性管理方向的研究工作。地址: 四川省成都市新都区新都大道 8 号西南石油大学, 610500。电话: 13880192633。Email: j822422@126.com

• Received: 2023-04-06

• Revised: 2023-05-14

• Online: 2024-06-17

