

# 我国天然气掺氢产业发展研究

仲冰<sup>1</sup>, 张学秀<sup>1</sup>, 张博<sup>1</sup>, 彭苏萍<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学(北京)管理学院, 北京 100083; 2. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 氢能产业是实现终端用能绿色低碳转型的重要依托, 而氢能输送效率是现阶段制约氢能产业发展的瓶颈环节; 天然气管道掺氢输送可在短期内提升氢能的时空调配规模与效率, 为扩大氢能应用规模提供解决方案。本文在界定天然气掺氢产业链范畴的基础上, 探讨了发展天然气掺氢产业在推动氢能产业发展、解决可再生能源消纳、保障能源供应安全、实现终端用能深度减碳、推动能源科技创新等方面的重要价值; 梳理了天然气掺氢产业的国际进展、国内现状, 据此凝练了掺氢比例、管材及终端设备适应性、安全性、经济性等关键问题。研究建议, 加强天然气掺氢产业顶层设计, 构建适合国情的天然气掺氢产业安全监管、技术与运营管理标准体系; 以政府引导、企业主导、多方参与、利益共享为原则, 积极布局掺氢天然气示范项目; 探索形成掺氢天然气多元化应用场景与商业模式, 培育健康可持续的天然气掺氢产业生态圈, 从而稳步推动掺氢天然气产业规模化发展。

**关键词:** 天然气掺氢; 氢能运输; 天然气管网; 可再生能源消纳; 产业规模化

**中图分类号:** F426 **文献标识码:** A

## Industrial Development of Hydrogen Blending in Natural Gas Pipelines in China

Zhong Bing<sup>1</sup>, Zhang Xuexiu<sup>1</sup>, Zhang Bo<sup>1</sup>, Peng Suping<sup>2</sup>

(1. School of Management, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The development of hydrogen industry is crucial for realizing the green and low-carbon transformation of terminal energy consumption. The efficiency of hydrogen transportation is key to the development of hydrogen industry. Blending hydrogen in natural gas pipelines can improve the scale and efficiency of hydrogen distribution in a short period of time, and it provides a solution for expanding the scale of hydrogen application. Based on defining the industrial chain of hydrogen blending in natural gas pipelines, the paper discusses the values of developing the blending industry in terms of promoting the hydrogen industry, resolving renewable energy consumption, ensuring energy supply security, realizing the deep carbon reduction of terminal energy consumption, and encouraging energy technology innovation. Moreover, the paper summarizes the international progress and domestic current status of the blending industry. It unravels key issues regarding the hydrogen blending proportion, adaptability of pipes and terminal equipment, and their safety use and technical economy. Furthermore, we propose the following suggestions: (1) strengthening the top-level design, (2) building a standards system for safety supervision as well as technology and operation management of hydrogen blending in natural gas pipelines, (3) actively deploying demonstration projects through multi-participation, and (4) exploring

**收稿日期:** 2022-03-10; **修回日期:** 2022-04-24

**通讯作者:** 张博, 中国矿业大学(北京)管理学院教授, 研究方向为能源战略与政策; E-mail: zhangbo@cumtb.edu.cn

**资助项目:** 中国工程院咨询项目“中国氢能源与燃料电池发展战略研究”(2019-ZD-03); 国家重点研发计划项目(2017YFB0601900);

国家自然科学基金项目(72088101)

**本刊网址:** www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

diversified application scenarios and business models, thereby cultivating a sustainable industrial ecosystem to steadily promote the scaled development of the industry.

**Keywords:** hydrogen blending in natural gas pipelines; hydrogen transportation; natural gas pipeline networks; renewable energy consumption; industrial scale development

### 一、前言

氢能作为清洁、高效、应用场景多元的能量载体，是连接传统化石能源与可再生能源的桥梁，成为当前能源产业发展的重要领域。发展氢能，可以有效优化能源结构，降低传统化石能源的消费量，促进能源结构转型升级；将有效减少碳排放并降低环境污染，支持实现碳达峰、碳中和目标。以氢能为要素之一，构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系，是落实能源安全新战略、推进能源革命的重要依托，对于新时期能源转型发展具有重要意义。

氢能产业分为上游制氢、中游储运、下游应用，涉及制氢、储氢、运氢、加氢、用氢等环节，具有链条长、关联度强、辐射广等特点 [1]。目前，我国氢能产业链的上游、下游分布存在严重的空间不均衡情况，因而大规模集中制氢、长距离输氢将是氢能产业发展的关键环节；在制氢成本持续走低的前景下，氢能的储运效率成为制约氢能产业化发展的瓶颈环节。适用于大规模氢能运输的技术方案主要有集装管束运输、管道运输、液氢槽车运输等 [2]，其中管道运输具有运量大、距离长、能耗少、成本低等优势 [3]，也是相对经济且低碳的方式。目前，世界氢气管道总里程超过 4600 km，发达国家的氢气长输管道建设及输氢技术较为成熟 [2-4]。在我国，纯氢管道建设进展缓慢（总里程约为 100 km），管道输氢技术体系仍在发展完善过程中 [3,4]，不能满足大规模氢能应用的实际需求；纯氢管道的初始投资大、建设周期长，很难在短期内形成与氢能发展需求相匹配的输运规模。

值得指出的是，近年来我国天然气管网基本建成，实现了天然气干线管道的互联互通 [5]；若在天然气中掺入一定比例的氢气以组成掺氢天然气，通过天然气管网将掺氢天然气输送至终端用户，随后或者直接利用、或者提氢后分别单独使用，将大幅提升氢能的时空调配规模与效率，实质性推动我国氢能产业快速发展。也要注意，天然气掺氢产

业发展尚处于技术研发与应用示范的起步阶段，技术体系的成熟度、掺氢天然气的使用效能及潜在影响均具有相当的不确定性。为此，本文基于天然气掺氢产业链构成，探讨天然气掺氢产业对我国能源行业高质量发展的价值，梳理天然气掺氢产业的国际进展、国内现状、关键问题，进而提出培育天然气掺氢产业的发展建议，以期对相关领域高质量发展研究提供基础参考。

### 二、天然气掺氢产业链范畴

《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》（2021 年）要求统筹推进氢能“储输用”全链条发展。天然气掺氢产业作为氢能“储输”的重要依托，需要从上游制氢到下游掺氢天然气终端利用等全产业链各环节的技术支撑。

制氢技术路线主要有化石燃料重整制氢（如煤制氢、天然气制氢）、工业副产氢（如焦炉煤气副产氢、氯碱工业副产氢）、清洁能源电解水制氢、其他制氢新技术（如太阳能光解水制氢、生物质制氢）[6]。我国是世界最大的制氢国，制氢产量约为  $3.3 \times 10^7$  t/a [7]；煤制氢作为我国现阶段的主要方案，技术成熟度高且成本相对低，但碳排放量大、环境污染问题不容忽视。未来随着风能、太阳能等新能源发电成本的降低，“可再生能源+电解水制氢”将降低碳排放强度，成为大规模制氢的优选方案 [4,6,8]。

天然气掺氢产业链的中游环节包括混氢、掺氢天然气储运，按照应用场景可分为向天然气长输管道、城市燃气管网掺混一定比例氢气来分别实现天然气掺氢输送。天然气、氢气均为清洁能源气体，天然气储运基础设施、关键设备对氢气均有一定的适应性；但天然气与氢气在能量密度、爆炸极限、扩散系数等特性方面又有明显差别，使得天然气掺氢输送对管材的适应性有特定要求，也会对压缩机、调压器、储气库、储罐、阀门等关键设备性能产生

潜在影响 [9~11]。已有研究表明,利用天然气管网输送低掺氢比天然气,原有管网的适应性较好;输送高掺氢比天然气,则需要更新(或改造)原有管材及设备,升级安全防控与应急技术体系 [12]。

天然气掺氢产业链的下游环节主要是终端多元应用生态。居民用户、商业用户、工业用户等终端用户,既可直接使用掺氢天然气,也可将掺氢天然气进行提氢分离后再分别使用。例如,建筑领域可将掺氢天然气应用于燃气灶、燃气热水器、燃气壁挂炉、小型锅炉等;工业领域可将掺氢天然气应用于工业锅炉、燃气轮机、燃气内燃机、工业窑炉、工业燃烧器等 [9,13,14]。掺氢天然气在交通领域也有良好的应用前景,如使用掺氢天然气燃料可有效提高天然气发动机的热效率并降低污染物排放 [15]。

### 三、发展天然气掺氢产业的重要价值

#### (一) 突破氢能产业规模化发展瓶颈

当前,氢能储运成本约占到“制储输用”全产业链总成本的30%~40% [10],在我国氢能储运基础设施发展薄弱的条件下,氢能产业发展遭遇“卡脖子”环节。按照氢能输送状态的不同,运输方式分为气态、液态、固态3类;气氢输送以长管拖车、纯氢管道输送、天然气管道掺氢输送为主,液氢输送以液氢罐车、专用液氢驳船、液氢管道为主。一般认为,长管拖车在运输距离小于200 km时具有成本优势;液氢远距离输送优势明显,但在现有技术条件下液化系统能耗高且初始投资大 [2~4]。

相较而言,纯氢管道输送、天然气管道掺氢输送都能够实现氢能的远距离、大规模、低能耗运输,但我国的纯氢管道规划与建设刚刚起步,形成大规模输氢能力必然需要较长的周期。我国天然气管网总里程约为 $1.1 \times 10^5$  km,“全国一张网”已基本建成,2025年总里程将达到 $1.63 \times 10^5$  km [16],这就为发展天然气掺氢产业提供了坚实的基础条件。可以认为,以掺氢天然气的形式开展氢能储运与利用,将是快速突破氢能产业规模化发展瓶颈的主要方式。

#### (二) 解决可再生能源消纳问题

我国西部地区风能、太阳能资源丰富,而区域

经济发展不均衡使得西部地区难以实现可再生能源的就地消纳;可再生能源发电面临间歇性、波动性、随机性、调峰难等问题,导致弃风、弃光现象严重。因此,利用可再生能源制储氢,将促进可再生能源的时空高效调配,提高可再生能源的消纳利用水平。我国可再生能源发电装机规模超过 $1 \times 10^9$  kW (2021年),叠加未来继续增长的装机量,为绿氢供给创造了极大空间。随着可再生能源制氢技术的完善提升以及综合成本的降低,积极发展天然气掺氢产业能够规模化利用可再生能源制取的绿氢,有效解决可再生能源的就地消纳问题;这又将引导风能、太阳能等资源的全面开发,从而进一步提高可再生能源在能源生产结构中的渗透率。

#### (三) 通过“氢进万家”来缓解天然气供应压力

2021年,我国能源消费总量为 $5.24 \times 10^9$  tce,其中天然气表观消费量为 $3.726 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup> (同比增长12.7%);结合天然气产量( $2.076 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>,同比增长7.8%) [17]来看,我国天然气供需存在明显缺口。在碳达峰、碳中和目标下,天然气作为清洁低碳的终端能源类型,能够与可再生能源发展形成良性互补的供能格局;2030年,我国天然气年消费量将达到 $5.5 \times 10^{11}$ ~ $6 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>,年产量在 $2.5 \times 10^{11}$  m<sup>3</sup>左右,供应压力进一步加大 [5,18]。掺氢天然气能够利用氢气替代一部分天然气消费,若按掺氢比(体积比)10%~20%测算,同等热值下,预计每年可替代 $1 \times 10^{10}$ ~ $2 \times 10^{10}$  m<sup>3</sup>,将在一定程度上缓解天然气的供应紧张问题。掺氢天然气的多元化终端应用,将促进氢能生产与终端用能双向协同,在参与保障天然气供应安全的同时,实现“氢进万家”。

#### (四) 实现终端用能领域深度减碳

掺氢天然气作为清洁低碳燃料,通过建成的天然气管网输送至工业、建筑、交通等难脱碳领域的终端用能设备,将降低终端用能的碳排放水平。荷兰2007年开展的天然气掺氢示范项目表明,天然气掺氢后能使燃烧产生的碳氧化物、氮氧化物排放量大幅降低 [10]。在建筑领域,利用掺氢天然气供暖是实现建筑领域能源消费低碳转型最有潜力的发展方向。在交通领域,掺氢天然气可提高天然气内燃机的热效率并减少排气损失,降低车辆尾气中的甲烷排放量。基于现有技术,将低于一定比例的氢气

掺入天然气管网，无需改造升级现有的天然气管网设施，因此发展天然气掺氢产业在有效提高天然气管网整体调峰能力的同时，支持实现终端用能的深度脱碳。

### （五）带动氢能全产业链科技创新

发展天然气掺氢产业需要可再生能源制氢、储氢、混氢、输氢、提氢、用氢等全产业链技术的综合发展。与领域先行国家相比，我国天然气掺氢产业起步较晚，掺氢天然气全产业链示范项目稀少，缺乏全面的技术体系和成熟的工程实践。着眼经济社会的实际需求，发展天然气管道掺氢技术，必将带动从能源生产端到消费端在内的全产业链科技创新，进而提升我国能源领域高端装备制造技术水平，催生能源产业转型升级新动力。如前所述，若按掺氢比（体积比）10%~20%测算，预计2030年有 $2.7 \times 10^6 \sim 6.3 \times 10^6$  t氢气掺入天然气管网；按照“制储输用”全生命周期成本（30元/kg）计算，全

产业链产值将达800~1800亿元/年。

## 四、天然气掺氢产业发展态势

### （一）国际天然气掺氢产业现状

天然气管网掺氢输送技术理念在1972年即已提出。随着可再生能源发电装机容量的快速增长、燃料电池技术的迭代升级，相关产业的发展受到更多关注。欧盟、德国、法国、美国等发达国家和地区均发布了氢能战略，认为天然气管道掺氢输送、将天然气基础设施改造为氢能基础设施是打破氢能运输瓶颈、促进氢能经济发展的重点内容（见表1）[19~25]。在标准层面，国际上氢气长输管道技术已经成熟，对应的设计标准规范研究较为全面，如美国ASME B31.12—2019、欧洲CGAG-5.6—2005、亚洲AIGA 033/06—2006 [9,26]等。天然气管道输送技术形成了较为完善的标准体系，如美国ASME B31.8—2018、ASCEALA—2001、加拿大CSA Z662—2011等。然

表1 主要国家和地区发展天然气掺氢产业的相关规划

时间	国家或地区	规划名称	规划内容
2020年7月	欧盟委员会	欧盟氢能战略	为天然气管网再利用项目提供资金支持，关键行动包括：2030年后重新利用现有的泛欧天然气基础设施，为大规模跨境运输氢气提供必要支撑；更新气体质量标准，确保天然气掺氢工程在不同成员国之间的顺利连通
2020年6月	德国	国家氢能战略	在扩建、增建纯氢管网的同时，评估现有天然气基础设施存储、运输氢气或改造成纯氢管道的可行性，提高氢能应用潜力
2020年9月	法国	发展无碳氢能国家战略	从2030年起，将20%氢气掺混至天然气管网并与天然气混合输送，促进天然气行业脱碳
2020年10月	俄罗斯	俄罗斯氢能发展路线图	在2024年前建立氢能全产业链，利用天然气等制取氢气，通过天然气管网掺氢或将现有天然气管道改造成氢气管道的方式进行氢能出口
2020年12月	美国	氢能项目规划	在未来的氢能研究、开发、示范总体战略框架中，将天然气掺氢输送作为中长期技术开发选项
2020年12月	加拿大	加拿大氢能战略	提出氢能2050战略愿景：建设氢能基础设施并促进终端应用，成为全球主要氢能供应国；氢气产量达到 $2 \times 10^7$ t/a，超过50%的氢气通过现有的天然气管网或者新建的纯氢管道进行输送
2021年8月	英国	英国氢能战略	重视氢能基础设施建设对氢经济的推动作用，2022年完成20%氢气掺混到天然气管道的价值评估，2023年开展社区供热试点；2025年以后集成氢气管网与天然气管网，2035年以后建立区域性或国家级氢能管网，推进天然气管网向氢能管网转换

而,天然气管道掺氢输送专用的技术标准体系有待研究制定。

在示范项目层面,诸多国家开展了天然气掺氢可行性研究、天然气管道掺氢输送示范工程建设,测试了不同比例的掺氢天然气对管网基础设施、终端设备的影响[27,28];已开展的天然气掺氢示范项目的掺氢比多在5%~30%,氢源以可再生能源制氢为主。2004年,欧盟NaturalHy项目联合15家天然气企业开展了天然气管道掺氢的潜在影响研究,认为天然气管道中掺入20%的氢气不会显著增加爆炸等安全风险[9,28]。2008年,荷兰开展了风电制氢掺入天然气管网VG2项目研究以明确掺氢比上限,2010年的平均掺氢比例达到12%[9,27,28]。2014年,法国GRHYD项目探索将风电制氢以不高于20%的比例注入天然气管网供居民使用,通过加气站为天然气动力客车提供掺氢比为6%~20%的掺氢天然气[9,27]。2019年,意大利国家天然气管网公司开展了5%氢气掺入天然气管网试验,目前掺氢比已提高至10%[9,28]。2019年,英国公司将20%氢气注入园区天然气管网以研究掺氢天然气对居民用户的影响[27,28]。2020年,澳大利亚启动了天然气掺氢示范项目,将基于可再生能源的电解水制氢以10%比例掺入到天然气管网并供用户使用[21,27]。美国HyBlend项目针对天然气管道掺氢输送的技术瓶颈环节,开展长期使用条件下天然气管材和操作对氢气的相容性评估[29]。

## (二) 我国天然气掺氢产业现状

目前,我国已是世界最大的制氢国,可再生能源装机量保持领先,未来可再生能源制氢的发展潜力巨大;基本建成了互联互通的天然气主干网,初步掌握了氢能“制储输用”全产业链的主要技术与生产工艺,发展天然气掺氢产业的基础条件良好。

《“十四五”能源领域科技创新规划》《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》密集发布,要求开展掺氢天然气管道及输送关键设备安全性、经济性、适应性和完整性评价,探索输气管道掺氢输送等高效输氢方式,开展掺氢天然气管道试点示范,逐步构建低成本、多元化的氢能储运体系。然而,天然气掺氢产业尚处于起步阶段,尚未出台国家层面的发展规划。部分省份发布了地方氢能产业规划,将天然气掺氢技术作为氢能储运及终端应用领域的突破口(见表2)。

全国氢能标准化技术委员会、全国燃料电池及液流电池标准化技术委员会牵头开展了氢能领域标准制定与修订工作。我国已发布的氢能相关国家标准有90余项,但涉及天然气掺氢技术的仅有《车用压缩氢气天然气混合燃气》(GB/T 34537—2017)1项。此外,《煤制合成天然气》(GB/T 33445—2016)规定了煤制合成天然气一类气中氢气含量(摩尔分数)不超过3.5%,二类气中氢气含量不超过5%;《进入天然气长输管道的气体质量要求》(GB/T

表2 部分省份的天然气掺氢产业规划情况

时间	地区	规划名称	规划内容
2020年1月	天津市	天津市氢能产业发展行动方案(2020—2022年)	探索掺氢天然气在工业、商业、民用等领域的应用
2020年9月	四川省	四川省氢能产业发展规划(2021—2025年)	开展高压、大容量管道运输氢技术及安全性研究,天然气管道材料与氢气相容性研究,掺氢天然气安全性研究
2021年7月	河北省	河北省氢能产业发展“十四五”规划	2022年进行氢气在天然气管道混输的试点示范,2025年扩大氢气在天然气管道混输领域的推广应用
2021年8月	北京市	北京市氢能产业发展实施方案(2021—2025年)	在氢能储运领域重点突破掺氢管道输送技术
2021年12月	广东省	深圳市氢能产业发展规划(2021—2025年)	开展天然气管道掺氢标准制订,探索管道掺氢输配技术和配套制氢技术研发及装备生产,小范围试点天然气管道掺氢等管道输氢项目,探索城市天然气管道掺氢技术
2022年2月	内蒙古自治区	内蒙古自治区“十四五”氢能发展规划	探索推进天然气管网掺氢规划建设,在通辽、乌兰察布、鄂尔多斯、乌海等地区开展掺氢燃气管道输送示范,开展天然气管道掺氢技术、中长距离管道输氢技术的研究与应用

37124—2018)规定了天然气中氢气含量(摩尔分数)不超过3%。

我国天然气掺氢示范项目起步较晚,目前初步建成的有2个:辽宁省朝阳市天然气掺氢示范项目,氢源为电解水制氢,掺氢比例为10%,实现了制氢、储运、掺混、利用全链条验证;山西省晋城市天然气掺氢示范项目,氢源为煤制氢。其他在建或规划的示范性项目有12个。

### 五、发展天然气掺氢产业面临的关键问题

天然气管道掺氢输送是一个复杂的系统工程,既要考虑技术可行性,还受安全性、经济性的制约。虽然包括我国在内的诸多国家都在积极开展天然气管道掺氢输送的示范应用,但在大规模推广应用之前需要系统解决以下关键问题。

#### (一) 掺氢比例问题

天然气掺氢后将对天然气管网基础设施及终端用能设备产生影响。掺氢天然气中氢气含量不同,对产业链不同环节、不同设备产生的影响也存在差异。各国对掺氢比例上限的规定不尽相同;而在我国,不同氢气含量对输气、用气设施设备产生的影响尚不明确,示范项目也未形成统一标准。大力发展天然气掺氢产业,需要率先论证并明确合适我国发展实际的掺氢比例。应综合考虑管材、设备、工艺的适应性,确定氢气含量阈值[30],确保天然气掺氢输送的安全性,平衡相应的技术经济可行性。

#### (二) 管材及终端设备的适应性问题

当前,投入运营的天然气管道是以输送天然气为基础进行设计的,以天然气为原料的工业用户工艺流程是基于天然气设计的,商业、居民用户的终端用能设备多以天然气为燃料。而在天然气掺氢后,必然在一定程度上改变管道内原有天然气的气质条件;管道本体、焊缝、压缩机、流量计、调压器、阀门等均暴露在高压富氢环境中,发生氢脆、氢腐蚀等氢损伤的风险有所加大[12,30],将对天然气管道的运行工况、设备性能、安全维护带来较大改变。对于终端用户,燃气器具、燃气轮机、锅炉、工业窑炉等燃烧设备因各自燃烧性能的不同而对掺氢天然气的适应程度不尽相同,需要考虑掺氢

后的燃气互换性以及掺氢对燃烧特性的影响,适时开展掺氢天然气与管材及终端设备的适应性分析。

#### (三) 安全性问题

相比于天然气的主要成分甲烷,氢气的爆炸极限范围更大,高压情况下的渗漏速率更快,更易发生泄漏自燃现象,相应地掺氢天然气泄漏后的爆炸风险也将有所扩大。对于终端用户,天然气掺氢后将降低气体的热值、华白数等参数,加快火焰燃烧速度,导致终端设备热负荷下降,增大使用过程的回火风险[28]。因此,天然气掺氢后既会在一定程度上增加天然气长输管道和城市燃气管网运营的安全风险,也对终端用能的安全性提出了更高要求;研究掺氢天然气泄漏扩散规律及安全风险管控,是发展天然气掺氢产业需重点关注的问题。

#### (四) 经济性问题

天然气管道掺氢输送可在短期内以相对少的资金投入来实现氢能长距离、大规模、网络化运输,有利于高效地将氢能产地与消费地连接起来。也要注意,同样体积氢气的热值只有天然气的1/3,假定天然气掺氢后能够在终端提供相同热值,则氢气价格理论上应是天然气价格的1/3;按照天然气门站价格1.8元/m<sup>3</sup>计算,氢气价格应为6~7元/kg,而这个价格远低于现阶段的制氢成本。从天然气掺氢全产业链发展的视角看,目前天然气掺氢项目的商业化应用并不具有经济可行性。因此,需要挖掘天然气掺氢的多元化应用场景,设计适合国情的天然气掺氢产业生态圈与商业模式,从而促进制氢企业、管网企业、终端用户等相关主体共同推动天然气掺氢产业的稳健发展。

### 六、培育天然气掺氢产业的建议

#### (一) 加强天然气掺氢产业的顶层设计和战略研究

天然气掺氢产业发展关系到氢能产业高质量发展、天然气工业转型发展,应加强天然气掺氢产业的顶层设计和宏观研究,深入剖析天然气掺氢产业发展的技术路线与重点任务,覆盖基础研究、装备研发、技术实证、应用研究、规范标准、性能测试、商业模式创新、教育推广等方面。完善天然气掺氢产业管理模式,建立掺氢天然气推广的激励机

制,合理加大对天然气掺氢全产业链的财政、金融支持力度。

## (二) 构建天然气掺氢产业安全监管、技术与运营管理标准体系

高标准开展天然气掺氢产业的安全与应急管理体系建设,探索建立基于信息技术、数字技术的天然气掺氢产业安全监管平台;加强管理部门之间的沟通协作,可延续天然气行业的管理模式,明确天然气掺氢产业各环节的监管部门及其责任义务。在当前天然气管网监管框架的基础上,完善天然气掺氢工程建设的监管审批流程。梳理天然气掺氢产业标准化工作重点,保持掺氢天然气与氢能、天然气、城镇燃气标准的协调发展;加快天然气掺氢产业的国家、行业标准体系建设,推动天然气掺氢产业的规范有序发展,技术性支持管理部门开展监管工作。

## (三) 加强天然气掺氢“政产学研用”合作

建议针对天然气管道掺氢输送、掺氢天然气终端利用,面向2030年、2060年研发与应用重大需求,设立国家级科技发展支持项目;加强国家级、地方性研发计划对天然气掺氢基础设施、技术和装备的国产化支持力度。遴选行业骨干企业、优势高校与科研院所,联合组建国家级天然气掺氢综合试验平台、工程技术中心,集中力量来共同开展天然气掺氢产业关键材料、技术、工艺、设备的科技攻关。支持高校、科研院所高质量开展氢能、天然气、综合能源等的学科建设与人才培养,鼓励天然气掺氢领域国际合作与技术交流,形成国际化的产业创新机制和模式。

## (四) 组建天然气掺氢产业创新联盟

把握未来10年天然气掺氢产业发展的重要机遇期,建议以政府引导、企业主导、多方参与、利益共享为原则,协调产业链相关企业积极投入并破除行业壁垒,建设“制氢-混氢-储运-提氢-用氢”一体化的产业链;探索形成掺氢天然气多元化应用场景和商业模式,培育健康可持续的天然气掺氢产业生态圈,共同拓展天然气掺氢产业发展新格局。鼓励油气企业、管网公司、城镇燃气企业加大投入,牵头组建天然气掺氢产业创新联盟,吸引产业链企业、科研院所、高校、行业协会等相关利益

主体广泛参与;建设跨行业沟通共享平台与合作机制,保障天然气掺氢产业规模化发展。

## 参考文献

- [1] 彭苏萍. 氢能产业链急需自主技术突破 [J]. 中国石油企业, 2021 (3): 13.  
Peng S P. Hydrogen energy industry chain urgently needs independent technological breakthrough [J]. China Petroleum Enterprise, 2021 (3): 13.
- [2] 刘翠伟, 裴业斌, 韩辉, 等. 氢能产业链及储运技术研究现状及发展趋势 [EB/OL]. (2022-03-24)[2022-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20220323.2055.004.html>.  
Liu C W, Pei Y B, Han H, et al. Research status and development trend of hydrogen energy industry chain and storage and transportation technology [EB/OL]. (2022-03-24)[2022-04-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1093.TE.20220323.2055.004.html>.
- [3] 曹军文, 覃祥富, 耿嘎, 等. 氢气储运技术的发展现状与展望 [J]. 石油学报(石油加工), 2021, 37(6): 1461-1478.  
Cao J W, Qin X F, Geng G, et al. Current status and prospects of hydrogen storage and transportation technology [J]. Acta Petrolei Sinica(Petroleum Processing Section), 2021, 37(6): 1461-1478.
- [4] 李星国. 氢气制备和储运的状况与发展 [J]. 科学通报, 2022, 67(4-5): 425-436.  
Li X G. Status and development of hydrogen preparation, storage and transportation [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(4-5): 425-436.
- [5] 国家能源局石油天然气司, 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所, 自然资源部油气资源战略研究中心. 中国天然气发展报告(2021) [R]. 北京: 石油工业出版社, 2021.  
Oil and Gas Division, National Energy Administration, Institute of Resource and Environmental Policy, Development Research Center of the State Council, Strategic Research Center of Oil and Gas Resources, Ministry of Natural Resources. China natural gas development report(2021) [R]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2021.
- [6] 曹军文, 张文强, 李一帆, 等. 中国制氢技术的发展现状 [J]. 化学进展, 2021, 33(12): 2215-2244.  
Cao J W, Zhang W Q, Li Y F, et al. Current status of hydrogen production in China [J]. Progress in Chemistry, 2021, 33(12): 2215-2244.
- [7] 国家发展和改革委员会. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035年) [EB/OL]. (2022-03-23)[2022-03-30]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323\\_1320038.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038.html?code=&state=123).  
National Development and Reform Commission. Medium- and long-term plan for the development of the hydrogen energy industry (2021—2035) [EB/OL]. (2022-03-23)[2022-03-30]. [https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323\\_1320038.html?code=&state=123](https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/202203/t20220323_1320038.html?code=&state=123).
- [8] 俞红梅, 邵志刚, 侯明, 等. 电解水制氢技术研究进展与发展建议 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(2): 146-152.  
Yu H M, Shao Z G, Hou M, et al. Hydrogen production by water electrolysis: Progress and suggestions [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(2): 146-152.
- [9] 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 R X, You S Q, Zhu X Y, et al. Development status and prospects of hydrogen compressed natural gas transportation technology [J]. Petroleum and New Energy, 2021, 33(4): 26–32.
- [10] 宋鹏飞, 单彤文, 李又武, 等. 天然气管道掺入氢气的影 响及技术可行性分析 [J]. 现代化工, 2020, 40(7): 5–10.
- Song P F, Shan T W, Li Y W, et al. Impact of hydrogen into natural gas grid and technical feasibility analysis [J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(7): 5–10.
- [11] 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.
- [12] 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 J F, Su Y, Zhang H, et al. Research progresses on pipeline transportation of hydrogen-blended natural gas [J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(4): 137–152.
- [13] 于子龙, 张立业, 宁晨, 等. 天然气掺氢管道运输及终端应用 [EB/OL]. (2022-01-07)[2022-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2064.O3.20220106.1855.004.html>.
- Yu Z L, Zhang L Y, Ning C, et al. Natural gas hydrogen mixing pipeline transportation and terminal application [EB/OL]. (2022-01-07)[2022-03-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2064.O3.20220106.1855.004.html>.
- [14] 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.
- Qiu Y, Zhou S Y, Gu W, 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.
- [15] 陈昊, 韩斌, 陈轶嵩, 等. 天然气汽车发展现状及趋势 [J]. 中国能源, 2018, 40(2): 36–41.
- Chen H, Han B, Chen Y S, et al. Development status and trend of natural gas vehicles [J]. Energy of China, 2018, 40(2): 36–41.
- [16] 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 中长期油气管网规划 [EB/OL]. (2017-07-12)[2022-03-30]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201707/W020190905497932558033.pdf>.
- National Development and Reform Commission, National Energy Administration. Medium- and long-term plan for oil and gas pipeline network [EB/OL]. (2017-07-12)[2022-03-30]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/ghwb/201707/W020190905497932558033.pdf>.
- [17] 国家统计局. 中华人民共和国2021年国民经济和社会发展统计公报 [EB/OL]. (2022-02-28)[2022-03-01]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227\\_1827960.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227_1827960.html).
- National Bureau of Statistics. Statistical bulletin of the People's Republic of China on the 2021 national economic and social development [EB/OL]. (2022-02-28)[2022-03-01]. [http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227\\_1827960.html](http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202202/t20220227_1827960.html).
- [18] 刘合, 梁坤, 张国生, 等. 碳达峰、碳中和约束下我国天然气发展策略研究 [J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 33–42.
- Liu H, Liang K, Zhang G S, et al. China's natural gas development strategy under the constraints of carbon peak and carbon neutrality [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 33–42.
- [19] European Commission. EU hydrogen strategy [EB/OL]. (2020-07-08)[2022-03-30]. [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf).
- [20] 贾英姿, 袁璇, 李明慧. 氢能全产业链支持政策: 欧盟的实践与启示 [J]. 财政科学, 2022 (1): 141–151.
- Jia Y Z, Yuan X, Li M H. Supporting policies for the whole industrial chain of hydrogen energy: The practice and enlightenment of EU [J]. Fiscal Science, 2022 (1): 141–151.
- [21] 韩笑, 张兴华, 闫华光, 等. 全球氢能产业政策现状与前景展望 [J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(12): 27–34.
- Han X, Zhang X H, Yan H G, et al. Current situation and prospect of global hydrogen energy industry policy [J]. Electric Power Information and Communication, 2021, 19(12): 27–34.
- [22] 熊华文, 符冠云. 全球氢能发展的四种典型模式及对我国的启示 [J]. 环境保护, 2021, 49(1): 52–55.
- Xiong H W, Fu G Y. Four typical models of global hydrogen energy industries development and their references for China [J]. Environmental Protection, 2021, 49(1): 52–55.
- [23] U. S. Department of Energy. Hydrogen program plan [EB/OL]. (2020-12-15)[2022-03-30]. <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>.
- [24] Canada's Ministry of Natural Resources. Hydrogen strategy for Canada [EB/OL]. (2020-12-17)[2022-03-30]. [https://www.nrcan.gc.ca/sites/nrcan/files/environment/hydrogen/NRCan\\_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf](https://www.nrcan.gc.ca/sites/nrcan/files/environment/hydrogen/NRCan_Hydrogen-Strategy-Canada-na-en-v3.pdf).
- [25] Department for Business, Energy & Industrial Strategy. UK hydrogen strategy [EB/OL]. (2021-08-17)[2022-03-30]. [https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/1011283/UK-Hydrogen-Strategy\\_web.pdf](https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1011283/UK-Hydrogen-Strategy_web.pdf).
- [26] 尚娟, 鲁仰辉, 郑津洋, 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.
- Shang J, Lu Y H, Zheng J Y. 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.
- [27] 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 H J, Xiong S J, Zhang X R, et al. Application status and analysis of technology for blending hydrogen into natural gas [J]. Gas & Heat, 2021, 41(10): 12–15.
- [28] 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 P, Wu Y, Li C J, et al. Research progress on pipeline transportation technology of hydrogen-mixed natural gas [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2021, 40(4): 361–370.
- [29] U.S. Department of Energy. HyBlend: Opportunities for hydrogen blending in natural gas pipelines [EB/OL]. (2021-08-15)[2022-03-30]. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-08-15/hyblend-tech-summary.pdf>.
- [30] 廖倩玉, 陈志光. 天然气管道掺氢输送安全问题研究现状 [J]. 城市燃气, 2021 (4): 19–26.
- Liao Q Y, Chen Z G. The safety research on blending hydrogen into natural gas pipeline [J]. Urban Gas, 2021 (4): 19–26.