

特色专题

城市场景下氢能应用发展现状与展望

王钦¹, 金意², 韩东旭³, 初开艳¹, 赵贤兰¹

摘要 围绕交通、电力、建筑等新兴城市氢能应用领域,系统梳理美国、欧洲、日本等发达国家差异化发展路径:美国以整合国内资源为核心,着力构建“可负担”氢能产业链;欧洲依托多元化应用示范项目推动技术落地;日本深耕氢燃料电池汽车与建筑领域集成应用。同时,进一步审视中国氢能产业发展现状,揭示技术成熟度、成本管控及基础设施建设等关键瓶颈。最后,立足国情,从顶层设计、产业布局、技术革新等维度提出国内发展路径,就制、储、运、用等具体方面提出前瞻性建议,强化氢能与电力、建筑系统耦合协同的重要意义,以期为中国氢能事业的稳健前行提供有力支撑。

关键词 氢能;燃料电池;基础设施;绿氢;储运

随着“双碳”目标提出,中国能源结构调整进一步提速。城市作为能源消费主体、碳排放集中区域,必将成为国家能源转型的主战场,充分发挥城市在能源革命中的引擎作用,将为中国能源低碳转型提供重要驱动力。氢能被全球公认为 21 世纪最具发展潜力的能源之一,中国《氢能产业发展中长期规划》将其确立为我国未来能源体系的关键组成,对能源绿色转型发展起到重要支撑。

中国是世界上最大的制氢国,年产能超过 3300 万 t^[1],但受制于氢的危化品属性,其应用范围多局限于化工、炼钢等传统工业领域^[2]。事实上,作为交通领域深度脱碳的核心路径、建筑能源系统低碳转型的关键驱动力,以及构建新型电力系统的核心要素,氢能在交通、建筑和电力等城市关键领域同样具有广阔应用前景(图 1)。本文力求系统剖析氢能在上述 3 大领域的发展现状、推广瓶颈及未来趋势,以期进一步拓展氢能应用场景、推动规模化应用,助力城市传统用能领域尽早实现碳达峰。

1 国外应用发展现状

1.1 美国

美国是最早倡导并发展氢能的国家之一,以《未来氢能法规》为起点,率先开展氢能相关研究、开发与示范工作。此后通过立法将氢能纳入国家战略框架,提出至 2040 年全面向氢能社会转型的发展目标^[3],并通过 H2@Scale 等项目整合国内资源,推动建立“可负担得起”的氢能产业链^[4]。目前,美国氢燃料电池汽车总量达到 17957 辆^[5],配套在营加氢站 74 座,其中加州集中分布 63 座^[6],形成以旧金山和洛杉矶 2 大城市群为核心、以 5 号州际高速为轴的“哑铃状”空间体系^[7],如图 2^[8]所示。2024 年美国宣布提供超过 9000 万美元以进一步支持加州与德州间的氢走廊建设,同步在 25 号州际公路沿线部署加氢网络。

美国借助其燃气轮机基础优势,已在陶氏铂矿工厂、大山精炼厂、富西纳电厂等实现掺氢燃气轮机的商业应用^[9],2021 年位于俄亥俄州的长岭电厂完成 5% 的掺氢燃烧测试,并计划在 2030 年达到 100% 氢气燃烧能力^[10]。此外,美国加速核能制氢商业部署,2023 年纽约州九里岬核电厂作为首个示范项目投运^[11],标志着核能制氢技术迈入实证阶段。俄亥俄州戴维斯-

1. 青岛市城市规划设计研究院,青岛 266022

2. 青岛能源集团有限公司,青岛 266101

3. 北京石油化工学院机械工程学院,北京 102617

收稿日期:2024-08-07;修回日期:2024-11-05

作者简介:王钦,高级工程师,研究方向为城市能源规划与低碳转型,电子邮箱:qdghy_wq@163.com

引用格式:王钦,金意,韩东旭,等.城市场景下氢能应用发展现状与展望[J].科技导报,2025,43(22):59-67;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2024.08.00971

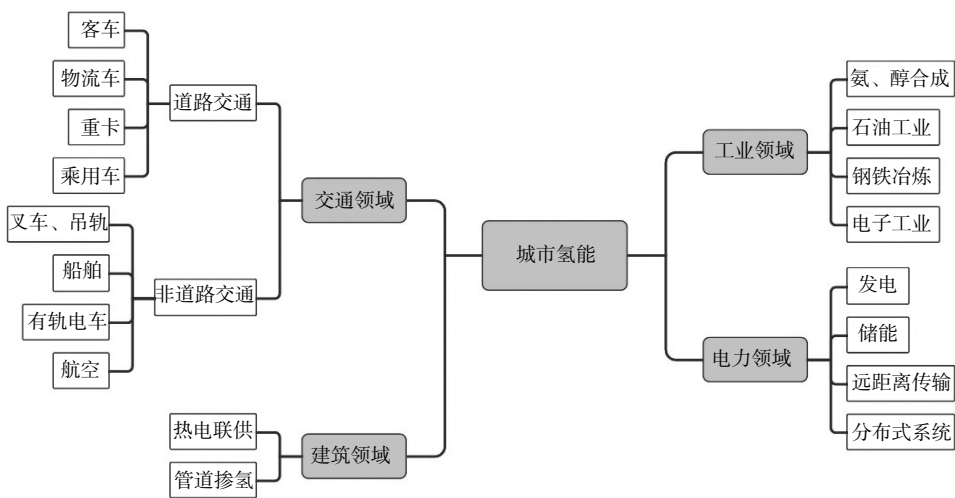


图1 城市领域氢能应用主要方式

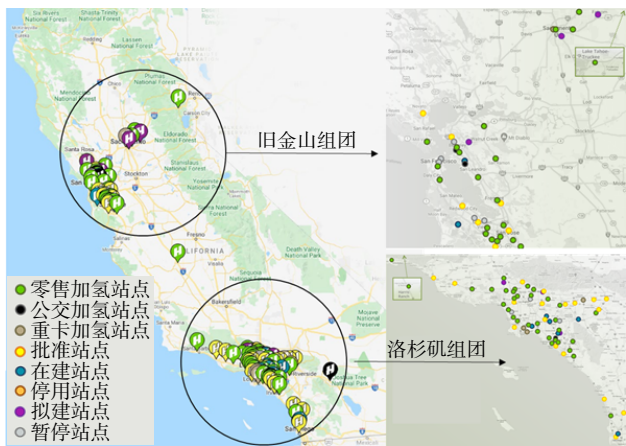


图2 美国加州加氢站分布

贝斯和明尼苏达州普雷里岛核能制氢项目也计划于近期投产^[12]，以进一步推动核能制氢规模化应用。

1.2 欧洲

2019 年《欧洲氢能路线图》明确氢能是欧洲在建筑、交通和工业领域大规模脱碳的最佳选择。2020 年，《欧盟氢能战略》将氢能视为交通、运输、化工、冶炼等行业低碳转型的终极方案，并系统谋划了未来 30 年发展蓝图与阶段目标。在此框架下，德国、法国、意大利、西班牙等相继制定国家氢能战略，加速推进本国氢能基础设施建设^[13]。欧洲氢能应用示范项目类型多元，涵盖可再生能源制氢、管网掺氢以及氢能热电联供等前沿领域，表 1^[14-21]择要列举了其中具有代表性的案例。

1.3 日本

日本自 1973 年便开展氢能生产、储运和利用相关技术研究，具备扎实的产业基础。2013 年《日本再

复兴战略》将发展氢能提升为国策，2017 年《氢能基本战略》描绘了从 2020 年到 2050 年的发展蓝图，为建立“氢能社会”提出具体目标和实施路径(表 2)。2014 年日本推出氢燃料电池汽车 Mirai，开启燃料电池汽车商业化元年^[22-23]。日本加氢站体系成熟、政策完备^[24]，总量达到 166 座，位列全球第 2，不仅在仙台与福岡间建立了全国性的氢能走廊，还与城市道路系统实现深度融合^[7]。日本建筑领域的氢能技术处于全球领先水平，2009 年率先发售家用燃料电池系统(ENE-FARM)，总效率达到 90%^[25]；2021 年推出商用燃料电池系统(H2 KIBOU)，并在澳大利亚詹达科特清洁能源创新中心实现应用。此外，2021 年全球首艘液氢运输船(SUISSO FRONTIER)由日本率先投用，该船可装载 2500 m³ 液氢，建立起日本和澳大利亚间的氢能供应链^[26]。

2 国内应用发展现状

2.1 交通领域

交通领域是当前中国继工业领域外的氢能应用核心场景，氢燃料电池汽车凭借环保、高效能、低噪声等特点成为推广和应用的切入点^[27]。目前全国氢燃料电池汽车保有量超过 1.8 万辆，形成以北上广及河南、河北为主的 5 大示范城市群。2022 年北京冬奥会投运超过 1000 辆氢燃料电池汽车，是迄今为止全球最大规模的集中示范。不同于欧美、日韩的乘用车推广策略，中国优先在公交车、城际客车等商用车中进行推广(如图 3^[28]所示)，在实现管理可控的同时，加速交通运输业的低碳转型^[29]。

表 1 欧洲部分代表性氢能示范项目

项目名称	主要内容	年份	国家
Lolland	一个远离城市地区也能够应对气候变化中创造经济价值的例子,是公认的“自下而上的最佳实践”。该项目建立了第一个以风力发电为基础的氢能源社区,在居民家中安装用于发电和供热的燃料电池装置,剩余的电力被卖回公共电网 ^[14]	2007	丹麦
MYRTE	法国最大的绿色氢气生产和储存平台,通过560 kW的太阳能电池板生产电力,利用并网的剩余电力电解液,用电高峰时通过氢燃料电池补充供电 ^[15]	2012	法国
HyDeploy	英国第1个天然气掺氢项目,通过原管道系统中掺入20%的氢实现为100户家庭和30座教学楼供气,证实氢能够安全地混合到天然气系统中而不需要中断或更换设施 ^[16] 。基于该项目成果,近期英国政府计划逐步将氢掺混到国家管网系统中 ^[17]	2020	英国
NorthH2	利用海上风能生产绿氢,并将氢储存和输送给工业和重型交通客户,到2030年后形成千兆瓦级绿氢生产规模。同时在荷兰和西北欧建立1个智能运输网络,通过天然气基础设施将绿氢输送至消费市场 ^[18]	2020	荷兰及欧洲部分国家
Duwaal	旨在生产和提供价格与柴油相当氢能,通过建立1条完整的产业链实现绿氢消纳。项目计划利用海上风电进行电解,安装1台5 MW电解槽,通过管道运输至枢纽站,然后分配至各加氢站 ^[19]	2022	荷兰
H2SAREA	西班牙首个国家级天然气掺氢示范项目,该项目已在原天然气管网系统中掺混10%的氢气,目前正向20%的目标发展 ^[20]	2022	西班牙
RefLau	利用风能和太阳能等生产的电力电解水制氢,氢用于工业生产、供热、交通等内容,多余部分以氢的形式存储,在用电需求量较大时用来生产电力进行调峰 ^[21]	2023	德国

表 2 2019—2024 年美国、欧洲、日本部分氢能政策汇总

国家	政策名称	主要内容	发布年份
美国	《氢能和燃料电池多年期计划》(MYPP)	面向2030年及更长期的氢能和燃料电池发展使命、技术目标和战略方向,具体包括制氢、氢基础设施、燃料电池技术、系统集成开发、系统分析、标准规范等	2024
	《美国国家清洁氢战略和路线图》	明确了2022—2036年的分阶段关键绩效目标,涵盖制氢、基础设施及供应链、终端应用和支撑技术等领域	2023
	《氢能项目计划2020》	涉及氢能全产业链的技术研发,预测到2050年美国本土氢能需求将增至4100万t/a,占能源消费总量的14%	2020
欧洲	《欧盟氢能战略》	将绿氢视为交通、运输、化工、冶炼等行业低碳转型的终极方案。提出氢能是支持欧盟2050年实现碳中和的必要条件,特别是通过可再生能源电解产生的“绿氢”	2020
	《德国国家氢能战略》	提出发展氢能是脱碳战略中深度减排的核心部分,且具有长期可持续性。德国将积极开发氢能技术,在降低成本的基础上先后开拓国内和国外市场,从而占据全球氢能领先地位	2020
	《法国国家氢能战略》	重点涉及3大领域:工业、运输和研究。一是通过氢能促进工业脱碳,二是将氢动力应用于轻型商用车、重型货车、公交、火车、轮船以及航空领域,三是持续支持氢能研发	2020
日本	《氢基本战略》(修订版)	2040年氢的供应量达到1200万t左右。开展燃料电池堆技术在商用车、铁路、机场、机械、农机、装卸货设备等领域的应用,同时推进港口及机场的脱碳	2023
	《第六次能源基本计划》	明确将建设氢能社会作为推动能源转型,实现碳中和目标的战略支柱,构建绿色氢能产业体系,推动氢能在制造业中的应用	2021
	《氢能与燃料电池技术开发战略》	确定燃料电池、氢能供应链及水电解制氢3大技术领域10项重点项目的优先研发事项	2019

中国加氢站近几年发展态势迅猛,总量达到407座,位列全球第1。中国加氢站不同于欧美国家,以站外制氢方式为主,通过长管拖车以气态形式运至加氢站(图4)。目前,国内尚未有在营液氢加氢站,管道输氢站集中分布在化工园区周边,如淄博齐鲁石化加氢站、宁波镇海炼化加氢站,站内制氢站则以试点为主,如辽宁大连甲醇制氢加氢站、广东佛山天然气制氢加氢站。

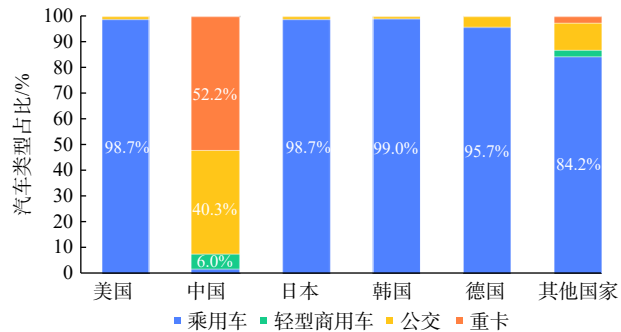


图3 主要国家氢燃料电池汽车类型占比

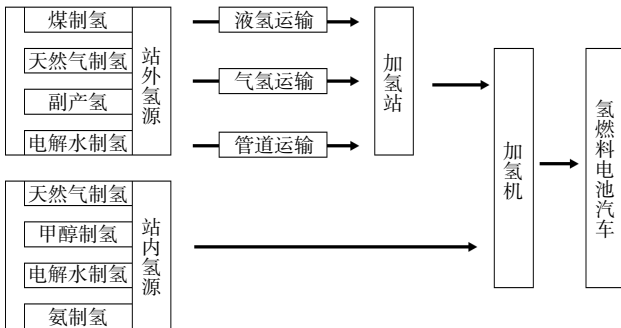


图4 不同氢源加氢站运行模式

除氢燃料电池汽车外,中国已有一批“氢港”初具规模,青岛港率先投用全球第1个氢动力轨道吊车,天津港启动氢燃料电池重卡示范应用,上海嘉定港打造源网荷储一体化示范场景。2013、2019年国内分别推出全球首列氢燃料电池混合动力有轨电车和首条商业运营氢燃料电池有轨电车^[30-31]。2020年《无人机用氢燃料电池发电系统》国家标准发布,成为全球首个国家级无人机用氢燃料电池标准。2022年“三峡氢舟1号”完成首航,标志着中国氢燃料电池技术在内河船舶应用实现零的突破^[32]。

2.2 电力领域

电氢协同有助于全社会实现深度脱碳,氢燃气轮机将在其中发挥重要作用^[33]。氢燃气轮机较天然气轮机具有更高的综合性能^[34],以掺氢运行作为技术切入点,改造现有燃气轮机成为推动氢燃气轮机技术发展的关键^[35]。2022年湖北荆门绿动54MW燃机实现30%的掺氢运行,2023年上海电气实现大F重型燃机掺氢7%的示范验证,2024年国内首台掺氢9HA.01型燃气轮机在惠州大亚湾实现发电并网。

储能技术是支撑新型电力系统建设的关键要素^[36],氢储能具有储量大、储时长的特点,还可实现跨区储能^[37]。“氢燃料电池+储能”的微电网模式能够提

高可再生能源利用率,实现更高的系统效益^[38-40],在离网场景(如偏远地区、海岛)中具有显著适用性^[41-42]。2022年,国内首座兆瓦级氢能综合利用示范站在安徽六安启动,同年浙江台州大陈岛构建了制氢—储氢—燃料电池热电联供模式,综合效率达96%以上^[43]。2024年宁夏宝丰一体化太阳能电解水制氢储能及综合应用示范项目试车成功,成为目前全球单厂规模最大、单台产能最大的电解水制氢项目。

2.3 建筑领域

建筑行业占全社会终端能源消耗的30%和碳排放总量的27%^[44],氢能利用是实现建筑领域节能降碳的重要途径。当前,氢能在建筑领域的应用聚焦于管道输氢与热电联供,其中管道输氢虽被公认为未来的主导方向^[45],却因建设成本高与建设周期长的双重制约面临落地挑战^[46]。在此背景下,管道掺氢凭借其灵活性与经济性,展现出重要的战略价值。国内天然气“一张网”逐步成型,借助既有天然气管网将大幅提升氢能的调配规模与效率。目前中国已建或待建的主要纯氢、掺氢管道项目见表3。

表3 国内掺氢、纯氢管道示范项目

类型	管道名称	长度/km	建设状态
纯氢管道	巴陵—长岭输氢管道工程	42.0	已建
	济源—洛阳输氢管道工程	25.0	已建
	金陵—扬子氢气管道	32.0	已建
	定州—高碑店氢气管道工程	164.7	待建
	乌兰察布陆上风电制氢输氢项目	400.0	待建
	乌海至呼和浩特输氢管道工程	500.0	待建
掺氢管道	朝阳天然气掺氢工程	—	已建
	陕宁一线掺氢示范工程	97.0	已建
	宁夏银川宁东天然气掺氢管道示范	397.0	已建
	内蒙古西部天然气包头—临河输气管道	258.0	待建
	广东海底掺氢管道工程	55.0	待建
	扎鲁特旗—乌兰浩特氢混天然气管线	230.0	待建

北京、上海、四川、广东等地相继明确将推广氢燃料电池热电联供技术,探索家用和商用氢燃料电池热电联供模式。2021年,全国首座氢进万家智慧能源示范社区在广东佛山投运,首次在居民用户端实现热电联供;2022年,氢能源冷热电三联供示范项目在江苏无锡投运,每年可发电35万kWh,产热24万kW。

此外,北京和西安两地率先在居住社区开展氢能供暖示范,标志着氢能能在城市清洁采暖领域实现突破性进展。

3 当前存在的问题分析

3.1 产业链成本偏高

中国氢能产业链整体面临成本偏高的问题。在当前制氢路径中,煤制氢成本最低,天然气制氢受原料价格影响较大^[47],而符合低碳发展的可再生能源制氢受电费和设备成本制约,成本达到传统制氢方式的2~3倍^[48](表4)。与此同时,中国西北、东北等地区集中了主要产能,而中东部地区承载核心应用场景^[49],显著的空间错位加剧了运输压力,长管拖车运力不足且经济性差的问题逐渐凸显,而大运量的输氢管道尚处于起步阶段。终端应用侧,氢燃料电池汽车购置成本居高不下(约为燃油车3倍、电动车1.5倍),加氢站建设亦存在投资壁垒(常规站点投资近1200万元,是传统加油站的3倍),进一步推高了氢能全生命周期使用成本。

表4 不同制氢技术成本对比

类型	氢气价格/(元·kg ⁻¹)
煤制氢	6~12
煤制氢结合碳捕集与封存	12~24
天然气重整制氢	10~18
天然气重整制氢结合碳捕集与封存	13~23
氯碱副产氢	13~20
焦炉煤气副产氢	9~14
电解水制氢	23~34

3.2 绿氢技术不成熟

当前中国以化石能源制氢为主,其中77.3%的氢源来自煤制氢与天然气制氢,21.2%来自副产氢,仅1.5%来自电解水制氢^[50]。“绿氢”全过程碳排放为零^[51],对中国能源绿色转型起到重要的支撑作用,但国内“绿氢”生产仍集中在小规模示范,支撑大规模、低成本生产的质子交换膜电解池和固体氧化物电解池等关键技术仍需进一步开发^[52]。此外,现有研究侧重于制氢技术本身,缺乏多产业耦合及规模化利用,不同制氢技术特点有差别,若仅考虑新能源的间歇性和波动性,难以保证规模化、连续化的供给。随着氢能能在电力、建筑等领域的扩展应用,还将进一步出现季节性峰谷特征。

3.3 储运支撑力不足

氢储运技术是扩大氢能应用规模的关键要素^[53],不同于传统领域产用耦合,随着城市领域氢能应用规模的扩大,现有储运体系已成为制约产业发展的关键掣肘。目前国内以20MPa长管拖车方式为主,单车运输量260~460kg,成本高、效率低,而国外采用的45MPa高压长管拖车,单车运输量可达700kg,大幅提高运输效率。液氢技术在欧美等国家与地区已进入规模化应用阶段,而国内民用领域尚处于萌芽阶段。同样在管道输氢方面,国内在役输氢管道总里程不足100km,天然气管道掺氢也多为试点层面,发展亟待提速。各类氢气运输方式对比详见表5^[54-55]。

3.4 设施建设不完善

中国的氢能产业发展已进入快车道,但随着产业规模与应用场景的增加,氢能基础设施建设不完善已

表5 氢气主要运输方式对比

类型	高压气氢	低温液氢	管道输氢
原理	将氢气储存在压力容器中,并由长管拖车运输	将氢气冷冻液化,再通过专用低温绝热槽罐进行运输	将氢气通过氢气管道运输或天然气管道掺混运输
优点	技术成熟、使用广泛	适合大批量、远距离运输	大规模、长距离、稳定
缺点	运输量小,装卸时间长,效率低	液化过程能耗较大,并需在终端建设专用接收设施	管道容易产生“氢脆”现象,氢气管道造价高
规模	260~460 kg/车(20 MPa)	4000 kg/车	310~8900 kg/h
应用	广泛用于小规模氢运输	美国等发达国家使用较多,国内主要在航空航天领域	主要在发达国家使用,国内主要在化工园区使用
适用距离/km	<300	>200	>500
运输成本/(元·kg ⁻¹)	5~40	10~14	2~15

成为制约整个产业持续发展的重要因素。虽然国内加氢站总数已达全球第1,但相对需求而言仍有较大缺口。根据各省市发布的加氢站发展规划,到2025年中国计划建设加氢站总量接近1200座(图5),但当前完成度不足40%。此外,随着国家政策支持力

度不断提高,各地培育氢能产业链的积极性愈发高涨,但产业发展同质化苗头有所显现,一定程度上出现了“重复造轮子”现象,未有效发掘氢能清洁低碳属性和多元应用的潜力。

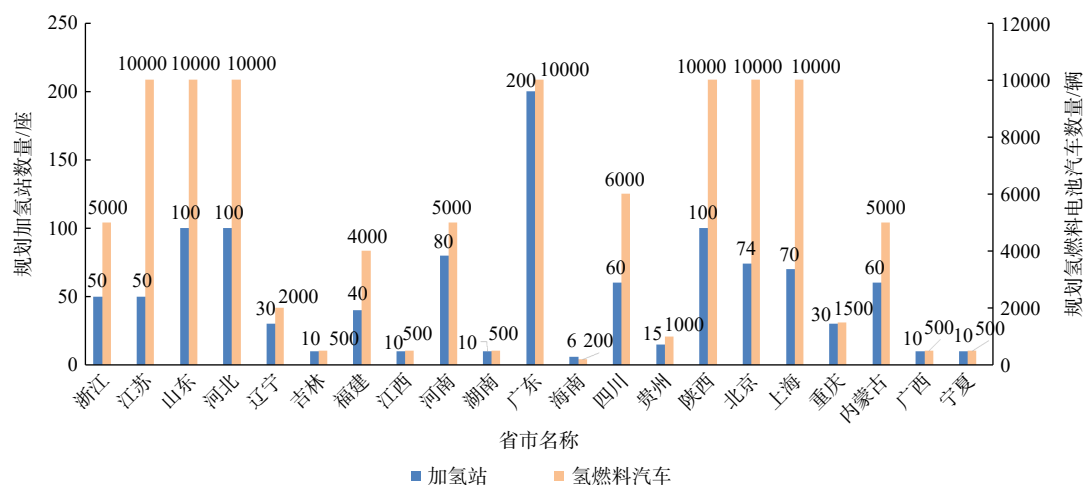


图5 中国主要省市2025年氢燃料汽车及加氢站发展规划

4 中国氢能应用发展的思考

4.1 发展策略

氢能是新能源领域少有兼具确定性与颠覆性的赛道,势必成为保障我国能源供应安全、推动能源结构转型升级的战略选择。为加速拓展氢能应用广度和深度,构建科学多元的氢能生态体系,建议从以下5方面着手。

1) 完善顶层设计,强化标准体系建设。尽快出台国家氢能基础设施发展规划、国家氢能行业标准,进一步明确氢能发展定位,持续增加行业信心,提高民众接受度,保障其顺利发展。

2) 统筹产业布局,实现特色差异发展。加速推动氢能产业化、规模化、标准化进程,各地区以自身资源禀赋、技术能力和产业现状为基础,理性布局氢能产业,走特色发展之路,走资源优势之路,避免无序竞争、同质化发展。

3) 突出示范引领,构建多元应用生态。坚持以市场为导向,加快基础设施布局,进一步提高服务范围和服务能力。深入推进氢能在交通领域示范应用,在冶金、化工、石化等工业领域规模应用,在储能、发电、建筑等新兴领域的试点应用,促进城市传统能源

体系向绿色低碳转型。

4) 加速技术攻坚,补全产业链短板。持续推进氢能制取、储运和应用等各环节核心技术研发,不断提高关键零部件技术创新和产业化水平,着力补齐短板、拉长长板、锻造新板。

5) 拓展绿氢赛道,打造多元泛氢体系。借助国内成熟的化石能源制氢、氨、甲醇产业链,推动绿氢产业由纯氢向氨、醇等拓展,打造绿氢、绿醇、绿氨等多元化能源供应体系,实现更广阔的“泛氢”发展模式。

4.2 具体建议

4.2.1 科学选择制氢路线

结合各地资源特点和产业布局,逐步构建清洁、高效、经济的多元制氢体系。近期鼓励在焦化、氯碱、丙烷脱氢等副产氢集聚区就近消纳,中期以化石燃料重整配合碳捕获与封存技术作为过渡,远期以可再生能源制氢作为大规模制氢主要方式。化石能源制氢匹配中国资源禀赋,当前在成本上具有优势,特别是协同二氧化碳资源化利用技术后在未来一段时期内仍具有发展潜力。但更重要的是发展可再生能源电解水制氢技术^[56],加大对关键材料和核心部件研发,设计耐用且稳定的电解槽,以提高能源转化效率和氢气产量。随着技术水平和生产效率的提升,以及

碳排放管控力度加大,预测 2030 年可再生能源制氢在成本上将具有竞争力,全球 50% 以上氢气价格将低于 2.5 美元/kg^[57-58],与煤制氢成本基本相当。

4.2.2 稳步提升储运效能

以安全可控为前提,积极开展多类型储运方式的探索和实践。(1) 逐步提高气态储运效率,提升高压气态储运商业化水平。研究表明,当长管拖车储运压力由 20 MPa 提至 30 MPa 后,储运成本下降近 1/2,经济运输半径提高近 1 倍^[54]。(2) 加快液氢核心技术国产化、平价化,推动低温液氢储运产业化应用。特别是在低温绝热方面,作为液氢储存技术的核心,其对液氢容器的绝热支撑能力起到关键作用^[59]。(3) 开展纯氢管道在管道材质、标准规范、成本控制,以及掺氢管道在相容性、分离提纯工艺及设备等方面研究,推动试点示范。(4) 加快氢电融合发展,考虑终端用氢形式,针对远距离、大规模绿氢输送可与特高压输电结合,以电能形式输送绿氢,构建灵活、高效的氢电供应网络体系。

4.2.3 加快推进交通领域应用

中国氢燃料电池汽车发展路径明确,即重点发展商用车,后续拓展到乘用车。在国家政策扶持下,交通行业,尤其是中长途、中重型等商用车领域,用氢成本将逐步接近燃油车和电动车,研究预测氢油、氢电平衡最早将分别于 2026、2029 年左右实现^[60]。统筹加氢网络建设,将氢能交通规划与城市规划紧密结合,从长期发展的角度对城市加氢站提前布局,实现氢能交通可持续发展。坚持安全为先,支持依法依规利用现有加油加气站改扩建加氢站,探索站内制储加一体化加氢站新模式。积极推进燃料电池在航运、航空领域应用,推动大型氢能航空器研发,不断拓展交通领域氢能应用市场类型和规模。

4.2.4 深度参与电力系统更新

根据各地既有能源基础设施条件和经济承受能力,因地制宜改造或建设氢燃气电厂。推动在园区、矿区、港口内开展氢燃料电池综合利用示范,结合偏远地区、海岛等用电需求,推动“氢燃料电池+储能”的微电网发展。进一步降低成本是实现氢能电力市场规模化应用的首要任务^[61],推动氢储能装备及各子系统的技术突破以及规模化发展,降低综合成本。研究显示,当氢储能的成本下降至 0.45 元/kWh 左右

时将开始具备较好的经济效益^[62]。逐步完善电力市场规则、提供补贴和投资税收减免等措施支持储能市场发展,逐步形成多种储能技术相互融合的电力系统储能体系。

4.2.5 积极融入建筑一体化发展

以国家级示范项目为牵引,充分发挥财政资金的杠杆效应,有效带动社会资本投入。系统构建氢能与建筑耦合发展的技术体系与标准规范,推动形成协同创新、规范引领的高质量发展格局。结合国内建筑特点提出以下 3 种应用模式:(1) 以社区、公共建筑为单位发展楼宇式热电联产,为家庭、办公、电梯、控制系统等供电,同时产生余热用于采暖和热水供应;(2) 利用天然气管道输送到用户终端直接燃烧使用;(3) 与建筑自动化系统结合,为实时监控建筑能源消耗、合理调整能源分配提供技术支持。

参考文献(References)

- [1] 国家能源局. 氢能, 现代能源体系新密码[EB/OL]. (2022-05-07) [2024-07-19]. https://www.nea.gov.cn/2022-05/07/c_1310587396.htm.
- [2] 徐江荣, 宋奥, 洪佳璇, 等. 低碳背景下氢应用现状与前景展望[J]. 能源环境保护, 2023, 37(1): 65-73.
- [3] U. S. Department of Energy. A national vision of America's transition to a hydrogen economy-To 2030 and beyond[EB/OL]. (2022-02-01) [2024-07-19]. http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/vision_doc.pdf.
- [4] U. S. Department of Energy. H2@Scale[EB/OL]. (2021-10-06) [2024-07-19]. <https://www.energy.gov/eere/articles/doe-announces-nearly-8-million-national-laboratory-h2scale-projects-help-reach>.
- [5] Hydrogen Fuel Cell Partnership. Fuel Cell Electric Vehicle Sales: 2012-2024[EB/OL]. [2024-07-19]. <https://h2fc.org/sites/default/files/FCEV-Sales-Tracking.pdf>.
- [6] U. S. Department of Energy. Hydrogen Fueling Station Locations by State[EB/OL]. [2024-07-19]. <https://afdc.energy.gov/data>.
- [7] 王钦, 金意, 于世晓, 等. 规划视角下加氢站布局体系与发展策略研究[J]. 城市燃气, 2021, 555(5): 32-35.
- [8] Hydrogen Fuel Cell Partnership. H₂-Stations-CA-map-Open-Funded-Proposed-2022[J/OL]. (2022-12-01) [2024-07-19]. h2fc.org/stationmap.
- [9] 秦锋, 秦亚迪, 单彤文. 碳中和背景下氢燃料燃气轮机技术现状及发展前景[J]. 广东电力, 2021, 34(10): 10-17.
- [10] 孙菲. “双碳”目标下掺氢燃气发电的现状与思考[J]. 当代

- 石油石化, 2023, 31(2): 40–44.
- [11] U. S. Department of Energy. Nine Mile Point Begins Clean Hydrogen Production [EB/OL]. (2023–03–07) [2024–07–19]. <https://www.energy.gov/ne/articles/nine-mile-point-begins-clean-hydrogen-production>.
- [12] U. S. Department of Energy. 3 Nuclear Power Plants Gearing Up for Clean Hydrogen Production [EB/OL]. (2022–11–09) [2024–07–19]. <https://www.energy.gov/ne/articles/3-nuclear-power-plants-gearing-clean-hydrogen-production>.
- [13] Fermin Cuevas, 张俊先, Michel Latroche. 法国、德国及欧盟对未来氢能研究和创新的愿景[J]. *Engineering*, 2021, 7(6): 31–39.
- [14] Magnoni S, Bassi A M. Creating synergies from renewable energy investments, a community success story from Loland, Denmark[J]. *Energies*, 2009, 2(4): 1151–1169.
- [15] FuelCellsWorks. MYRTE: the largest green hydrogen production and storage platform in France [EB/OL]. (2023–02–10) [2024–07–19]. <https://fuelcellworks.com/news/helion-hydrogen-power-a-pioneer-in-hydrogen-fuel-cells-located-in-france-will-deliver-one-of-the-most-advanced-fuel-cell-systems-in-the-world-to-the-environment-sciences-laboratory-a-joint-laboratory>.
- [16] Isaac T. HyDeploy: The UK's first hydrogen blending deployment project[J]. *Clean Energy*, 2019, 3(2): 114–125.
- [17] Department for Energy Security and Net Zero. Hydrogen Blending into GB Gas Distribution Networks: A Strategic policy decision [EB/OL]. (2023–12–14) [2024–07–19]. <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/657a0a82254aaa0010050cde/hydrogen-blending-strategic-policy-decision.pdf>.
- [18] Energy Industry Review. Europe's largest green hydrogen Project: NorthH₂ [EB/OL]. (2020–12–07) [2024–07–19]. <https://energyindustryreview.com/renewables/europes-largest-green-hydrogen-project-north2/>.
- [19] HYGRO. Duwaal: producing, distributing, fueling and driving green hydrogen in North Holland [EB/OL]. [2024–07–19]. <https://hy-gro.nl/project/project-duwaal>.
- [20] Green energy news. H₂ Sarea Project Paves the Way for Hydrogen Integration in Natural Gas Networks [EB/OL]. (2023–07–18) [2024–07–19]. <https://energynews.biz/h2sarea-project-paves-the-way-for-hydrogen-integration-in-natural-gas-networks/>.
- [21] Reflau. Das Projekt RefLau [EB/OL]. [2024–07–19]. <https://www.reflau.com/projekt>.
- [22] 陈英姿, 刘建达. 日本车用氢能的产业发展及支持政策[J]. *现代日本经济*, 2021, 40(2): 80–94.
- [23] 王佳, 周玮, 姚占辉, 等. 日本燃料电池汽车产业发展经验与启示研究[J]. *中国汽车*, 2019, 29(12): 36–39.
- [24] 李凤迪, 程光旭, 贾彤华, 等. 加氢站发展现状与新模式探析[J]. *现代化工*, 2023, 43(4): 1–8.
- [25] 刘兰兰. 日本家用燃料电池技术进展[J]. *电源技术*, 2015, 39(6): 1337–1339.
- [26] 时光志. 液氢运输船技术现状及发展方向[J]. *船海工程*, 2022, 51(2): 81–85.
- [27] 楼狄明, 赵克秦, 石秀勇, 等. 氢能技术及其在车用领域应用现状综述[J]. *内燃机与配件*, 2024(7): 140–143.
- [28] IEA. Fuel cell electric vehicle (FCEV) stock by region and by mode, 2022 [EB/OL]. (2023–04–26) [2024–07–19]. https://www.iea.org/t_c/termsandconditions/.
- [29] 林坦. 我国公路交通减碳的形势要求与政策重点[J]. *中国公路*, 2023(3): 88–95.
- [30] 王娇, 张攀, 齐洪峰, 等. 我国氢能列车发展研究[J]. *铁道运输与经济*, 2023, 45(9): 162–168.
- [31] 陈维荣, 王颖民, 李秉训, 等. 氢能轨道交通的研究现状与发展趋势[J]. *机车电传动*, 2023(3): 1–11.
- [32] 孟翔宇, 顾阿伦, 曾静, 等. 中国氢能交通产业的现状、挑战与展望[J]. *科技导报*, 2024, 42(3): 6–26.
- [33] 李海波, 潘志明, 黄耀文. 浅析氢燃料燃气轮机发电的应用前景[J]. *电力设备管理*, 2020(8): 94–96.
- [34] Koç Y, Yağlı H, Görgülü A, et al. Analysing the performance, fuel cost and emission parameters of the 50 MW simple and recuperative gas turbine cycles using natural gas and hydrogen as fuel[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(41): 22138–22147.
- [35] 全球能源互联网发展合作组织等. 燃气轮机氢能发电全球技术发展蓝皮书 [EB/OL]. (2022–10–15) [2024–07–19]. <https://aiqicha.baidu.com/yuqing?yuqingId=43ab5025c986af23ff48e8d7e55f6240&type=report>.
- [36] 国家能源局. 新型电力系统发展蓝皮书[R]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [37] 许传博, 刘建国. 氢储能在我国新型电力系统中的应用价值、挑战及展望[J]. *中国工程科学*, 2022, 24(3): 89–99.
- [38] Chen H P, Wu H, Kan T Y, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated energy system containing electric hydrogen production based on VMD-GRU short-term wind power prediction[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 154: 109420.
- [39] 聂聪颖, 沈小军, 吕洪, 等. 并网型风电场氢超混合储能容量配置及控制策略研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(9): 1–8.
- [40] Mah A X Y, Ho W S, Hassim M H, et al. Optimization of photovoltaic-based microgrid with hybrid energy storage: A P-graph approach[J]. *Energy*, 2021, 233: 121088.
- [41] 范宏, 于伟南, 柳璐, 等. 双碳目标下考虑电氢互补的智慧园区多楼宇协调调度[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(21): 42–51.
- [42] 李星仪, 沈小军, 金钰. 基于氢储能的偏远地区零碳微网构建及运行策略研究[J]. *可再生能源*, 2024, 42(2): 223–232.

- [43] 郭洋. 国内首个海岛氢能示范项目: 热电联供系统研究[J]. 河南电力, 2022(S2): 81–85.
- [44] UN environment programme. Global Status Report for Buildings and Construction[EB/OL]. (2024–03–07) [2024–07–19]. <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction>.
- [45] 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.
- [46] 程玉峰, 孙颖昊, 张引弟. 氢气管道发展与管线钢氢脆挑战[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2022, 19(1): 54–69.
- [47] 张轩, 樊昕晔, 吴振宇, 等. 氢能供应链成本分析及建议[J]. 化工进展, 2022, 41(5): 2364–2371.
- [48] 徐硕, 余碧莹. 中国氢能技术发展现状与未来展望[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(6): 1–12.
- [49] 刘翠伟, 裴业斌, 韩辉, 等. 氢能产业链及储运技术研究现状与发展趋势[J]. 油气储运, 2022, 41(5): 498–514.
- [50] 李建林, 李光辉, 马速良, 等. 碳中和目标下制氢关键技术进展及发展前景综述[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 1–8.
- [51] 国家发改委, 国家能源局. 氢能产业发展中长期规划(2021—2035年) [EB/OL]. (2022–03–23) [2024–07–19]. <https://www.gov.cn/xinwen/2022-03/24/5680975/files/6b388-f7c324a4b1db0b30dc6f52b7e02.pdf>.
- [52] 曹军文, 张文强, 李一枫, 等. 中国制氢技术的发展现状[J]. 化学进展, 2021, 33(12): 2215–2244.
- [53] 陈祖志, 管坚, 黄强华, 等. 氢能产业发展现状及其对特种设备行业的机遇和挑战[J]. 中国特种设备安全, 2019, 35(9): 1–13.
- [54] 张仲军, 金子儿, 曾玥, 等. 我国氢能规模化储运方式经济性分析[J]. 中国能源, 2023, 45(12): 27–37.
- [55] 闫喻婷. 氢气储运方式的经济性对比研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [56] 李海鹏, 孙邦兴, 李嘉焯. 双碳目标下绿色制氢技术的进展[J]. 电池, 2024, 54(2): 271–275.
- [57] 天工. 绿氢10年内将具有成本优势[J]. 天然气工业, 2021, 41(1): 117.
- [58] Hydrogen Council. Global Hydrogen Flows–2023 Update [EB/OL]. (2023–11–16) [2024–07–19]. <https://hydrogen-council.com/wp-content/uploads/2023/11/Global-Hydrogen-Flows-2023-Update.pdf>.
- [59] 王鑫, 陈叔平, 朱鸣. 液氢储运技术发展现状与展望[J]. 太阳能学报, 2024, 45(1): 500–514.
- [60] 张磊, 谢南宏, 曹田田, 等. 氢能在交通领域的应用及燃料电池汽车成本分析[J]. 石油石化绿色低碳, 2022, 7(4): 1–5.
- [61] 张真, 黎妍. 氢储能经济性及应用前景研究[J]. 价格理论与实践, 2023(2): 93–97.
- [62] 邵志刚, 衣宝廉. 氢能与燃料电池发展现状及展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 469–477.

Development status and prospects of hydrogen energy applications in urban scenarios

WANG Qin¹, JIN Yi², HAN Dongxu³, CHU Kaiyan¹, ZHAO Xianlan¹

1. Qingdao Urban Planning & Design Research Institute, Qingdao 266022, China

2. Qingdao Energy Group, Qingdao 266101, China

3. School of Mechanical Engineering, Beijing University of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China

Abstract Hydrogen energy, recognized globally as a clean energy source, demonstrates significant potential in supporting climate commitments and energy transition. Driven by the "dual carbon" target, China's hydrogen energy industry has entered a rapid development phase. This paper focuses on emerging hydrogen energy application sectors, such as transportation, electricity, and construction. Relevant policies and cases from several developed countries in recent years are summarized. Current status and achievements of domestic hydrogen energy applications in the three sectors are reviewed and also some key issues. Finally, a development pathway for hydrogen energy which conforms to China's national conditions and some forward-looking recommendations are proposed. The purpose of this paper is to provide support for the steady development of hydrogen energy in China.

Keywords hydrogen energy; fuel cell; infrastructure; green hydrogen; storage and transportation ●



(责任编辑 赵庆圆)