

氢能利用的瓶颈分析与前景展望

刘贵洲¹ 窦立荣² 黄永章³ 邹才能² 许 昕¹

1. 中国石油国际勘探开发有限公司, 北京 100034;

2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083;

3. 中国石油天然气集团有限公司, 北京 100007

摘 要:清洁燃料氢能具备净零排放,燃烧值高,在燃料电池中利用充分有效,绿色制氢可消纳太阳能和风能发电间歇式、状态高低起伏不定的不足等诸多优点。氢燃料电池汽车具备高续航、加注时间短等优势。但氢能利用存在技术和成本两大瓶颈,制约着氢能广泛利用。随着世界各国陆续采取政策扶持、政府推动、企业大规模行动等措施,以及技术不断进步推动成本下降,氢能利用必将拥有广阔的发展前景。中国氢能利用现处于起步阶段,各级政府纷纷做出规划、出台扶持和激励政策,上海、苏州、佛山等城市走在前列;企业也积极行动起来,中国石油、中国石化等企业的制氢、加氢业务,燃料电池、氢能源汽车业务,以及未来规划已经展开。为此建议:国家层面要构筑好发展氢能的良性机制;加快构建上中下游完整的“氢气工业”;地方政府要积极发展与慎重论证并重;企业要积极付诸转型行动,占据氢能先机。

关键词:新能源;氢能利用;瓶颈;前景展望

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2021.03.001

Analysis on hydrogen energy utilization bottlenecks and future prospect

LIU Guizhou¹, DOU Lirong², HUANG Yongzhang³, ZOU Caineng², XU Xin¹

1. China National Oil and Gas Exploration and Development Company Ltd., Beijing, 100034, China;

2. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing, 100083, China;

3. China National Petroleum Corporation Ltd., Beijing, 100007, China

Abstract: As one of clean fuels, hydrogen energy has many advantages such as zero emission, high calorific value, and can be fully and effectively utilized in fuel cells. The green hydrogen produced in a sustainable manner is able to overcome the short comings of solar energy and wind power as their energy supply is unstable and fluctuating. Hydrogen fuel cell vehicle enjoys the advantages of high endurance and short refuelling time. However, there are two major bottlenecks that limits the broader utilization of hydrogen energy, i. e. technology and capital costs. With policy supports, government promotion, economy of scale approach by enterprises in countries around the world, together with technological

收稿日期:2021-03-30

基金项目:国家科技重大专项“四川盆地及周缘页岩气形成富集条件、选区评价技术与应用”资助成果(2017ZX05035)

作者简介:刘贵洲(1969-),男,江西九江人,高级经济师,硕士,主要从事企业战略、经济分析、企业经营管理研究。E-mail:liuguizhou@cnpcint.com

通讯作者:窦立荣(1965-),男,江苏扬州人,教授级高级工程师,博士,长期致力于石油地质研究和跨国风险勘探工作。E-mail:dlirong@petrochina.com.cn

advances driving down capital costs, the utilization of hydrogen energy will have broader prospect for future development. China's hydrogen energy usage is still in its infancy stage, government authorities at all levels have successively introduced development plans, and provided supportive policies and incentive plans. Among them, Shanghai, Suzhou, Foshan and other cities have taken the lead. Enterprises are also taking timely actions, for example, corporations including PetroChina and Sinopec have launched business sectors in hydrogen production, hydrogen filling stations, fuel cells, hydrogen fuel cell vehicles, and master planning for the future. To this end, this paper suggested that a sound mechanism should be developed at state level for the development of hydrogen energy; speeding up the set-up of an integrated "hydrogen industry" in the upstream, midstream and downstream sectors; local governments should pay equal attention to the active development and prudent demonstration of hydrogen energy; enterprises should pro-actively carry out its transformation and take the lead in the development of hydrogen energy.

Keywords: New energy; Hydrogen energy utilization; Bottleneck; Future prospect

0 前言

2021年2月上旬,中国石油在张家口合资建设的一座加氢站竣工投产,开始为2022年冬奥会崇礼赛区大巴加注氢能,10 d内加氢近4 000 kg,服务365台次,未来满负荷将日均加注1 000 kg。该站位于崇礼赛区核心区域,是中国石油首座加氢站,也是冬奥会首座加氢站。2020年11月,张家口市与壳牌公司开展氢能一体化示范基地合作,投资5.8亿元建设1座制氢厂、3座加氢站,一期年产3 000 t,以满足400多辆氢能公交车的需求。作为全国运营氢能公交车最多的城市,张家口市已有214辆氢能公交车在运行。

氢能目前已经为世界上许多国家、许多油气公司所青睐。在净零排放声浪高涨的当下,这种具备净零排放“天性”的氢能源必然更受推崇。

1 氢能优势

1.1 氢能是清洁燃料

氢气不仅是清洁燃料,且最能实现净零排放。氢燃烧值高,单位质量氢的热值是天然气热值的2.6倍、汽油热值的3.1倍、煤炭热值的4倍。绿色制氢可消纳太阳能和风能发电间歇式、状态高低起伏不定的不足。在燃料电池中氢能利用充分有效。氢能的利用范围与天然气的利用范围类同^[1]。

氢能用在不同的领域,又具有各自不同的优点。

1)在运输行业,与传统燃油汽车比,氢燃料电池汽车不产生污染,又比电动汽车加注时间短、续航远。可见,氢燃料电池汽车具备大规模推广的潜力。在政府补贴和其他政策支持前提下,氢燃料电池汽车使用成本在不远的未来可与燃油汽车和电动汽车相比,且未来随着技术进步和规模效应,成本会进一步降低。氢能公交车目前已在欧洲20多个城市使用,在我国也有多个城市试

行;较长距离、固定路线的快递货车和载重货车等重型卡车,以及水上交通运输等都将可大规模应用氢能^[2]。

2)氢能可作为固定能源用于建筑、社区等的供能载体和备用能源。燃气中混入一定量的氢气,燃烧使用与天然气相同,但单位热值更高、碳排放更低^[3]。风电和太阳能发电与建筑用热在季节上、昼夜交替和有风无风等方面存在不匹配问题,氢能恰好可用来补充调节备用。

3)氢能可用于工业冶金、汽油精炼工艺、玻璃磨光、黄金焊接等多个领域,既可作为某种化学过程的原料,还可提供工业高温过程加热。在减碳困难的钢铁和水泥行业,绿氢至关重要。低(零)碳氢在工业上应用范围不断扩大。

氢能不是一种初始能源,而是一种能将一次能源与二次能源很好结合的能源载体,需要用其他的能源加工得来。由于它改变了传统的供能路径,将“燃烧”、电转换和电驱动有机结合为一体,使其运输用能与燃油燃气驱动、电驱动比,更清洁、更便捷。

1.2 氢能利用产业链完整

氢能利用产业链长,包括从制氢、储、运、注,到燃料电池和终端利用等。氢能产业链政策依赖性强,并且投入大、产出慢、技术含量高、竞争激烈、完全市场化^[4]。

1.3 氢气制备来源广泛

氢气可由多种方式制备而得。制备方式不同,得到的氢名称也不同,有绿氢、蓝氢、灰氢和棕氢(褐氢)之分。绿氢由电解水得到,或由氨高温分解得到,或生物质气化、光解水得到。电解水是绿氢制备的主要方式,整个过程零碳排放,并能有效利用风电和太阳能发电,很好地解决该类发电存在不连续、状态不平稳的缺陷^[5-6]。蓝氢来自于天然气,由蒸汽甲烷转化(SMR)制取。灰氢主要通过焦炉煤气、氯碱尾气等制备。棕氢(褐氢)由煤炭、石油等高碳化石能源制备。蓝氢、灰氢和棕氢(褐氢)产自化石能源和工业尾气的制氢过程,碳

的成分始终存在,因此仍然存在碳排放问题^[7],只有配套碳捕捉、收集、利用和储存(CCUS),才能达到减碳效果。可见这三类氢并不是净零碳能源^[8]。

1.4 氢气运输方式多样

氢气可通过管道运输、拖车运输和罐车运输。拖车运输在我国较普遍,且技术成熟度高。不过这种方式效率低,40 t 拖车才运输氢气 400 kg,因此只在短途 200 km 以内的小规模运输上才比较可行^[9]。

2 氢能利用瓶颈分析

氢能存在一些天然不足:比天然气更贵;应用范围不如电的应用范围广泛,比如暂时还不能应用在电子设备上;在运输方面存在“氢脆”现象,会对传统油气管道产生一定的破坏等等。因此目前氢能利用存在技术和成本两大瓶颈。

2.1 技术瓶颈

氢能产业链各个环节都需要技术突破,尤其是燃料电池中的膜电极(质子交换膜)、催化剂、制氢环节的生物质能气化、热解、热化学水电解、黑暗发酵等制氢技术,运输环节中的“氢脆”问题,氢气液化和船舶运输等技术^[10]。其中的关键核心技术是氢燃料电池技术,吸引了众多企业集中技术攻关,致力产业化发展。氢燃料电池未来需求大,且行业竞争激烈,将会配套该类汽车的动力装置并行发展。

2.2 成本瓶颈

电解制氢、燃料电池、氢网基础设施及 CCUS 等环节都需要降低成本。氢能利用目前还不能与化石能源、电能利用相媲美,绿氢的制取成本又比蓝氢、灰氢的制取成本高很多。国际能源署公布,灰氢价格约为 11.9 元人民币/kg;蓝氢价格略高于灰氢价格,为 16 元人民币/kg;绿氢最贵,达到 27.78~39.68 元人民币/kg。在中国,上述价格还要高得多^[11]。

高成本的氢能利用需要仰赖技术进步、规模化和集成化生产,以及政府补贴、碳税征收等政策扶持,还需要全社会对能源转型的高度期待,需要形成共同推动的合力。

绿氢制备的经济性对两个因素特别敏感:电价和水电解产能利用率。负荷率要达到 50% 以上,电价要在 30 美元/MW·h 以下才具备大规模利用的条件,这在目前都远达不到。经过一段时间努力,负荷率可望接近 20%;可再生能源购电协议价可望随着风能和太阳能电力的大规模增长而接近 50 美元/MW·h。显然这还有很大的努力空间^[12]。

绿氢制备远未达到规模化。全球电解制氢仍处于初始阶段,电解制氢项目都较小,规模都不大。尽管氢

气产能已有 3.2 GW,而且成长得很快,但绿氢仍可说是微乎其微,只有 3.65 亿美元的投资、94 MW 的产能。即使是格外青睐绿氢的中国、日本、美国、欧洲和澳大利亚,迄今发展绿氢也都微不足道。为能源转换的绿氢产能更低,欧洲的产能都只有 32 MW,单个电解制氢项目产能都在 1 MW 以下;欧洲以外估计不超过 5 MW。

膜电极尚未实现根本性的技术突破,因此降低其成本是降低燃料电池汽车价格的关键。膜电极是燃料电池的核心部件燃料电堆的核心组件,其中的催化剂目前是铂。铂金属稀缺,价格昂贵,大量使用必然使膜电极和燃料电池汽车价格居高难下。因此,寻找替代催化剂、降低铂金属用量是降成本的关键途径。燃料电池汽车价格目前是普通汽车价格的两倍,要想普及,必须降低成本,比如提高性能、缩小体积、加大输出量、降低铂金使用量等^[13]。

碳税是关键,如果 2030 年全球平均碳税达到 40 美元/t,绿氢利用成本才可与蓝氢+碳捕捉与储存(CCS)有一比,但与燃油和其他电力比仍有差距。由此可见,氢开始对减碳做出有实际意义的贡献恐怕要到 2030 年以后。

突破氢能利用的成本瓶颈还需要各国政府政策支持 and 全社会对能源转型的期待。需要各国和各大公司采取战略性举措,推动氢能利用,尤其是绿氢,把绿氢作为减碳战略重要组成部分,推动绿氢利用大步向前,进而驱动成本下降。这需要研发投资、技术进步、投资者试投项目,以及可再生电力大幅增多的电力企业联合使力,大力度推动氢能大规模利用。

3 氢能利用前景展望

3.1 世界各地纷纷出台氢能战略,竞相采取政策扶持

3.1.1 欧盟

欧盟是发展氢能最积极、力度最大的经济体之一:2008 年建立“氢能和燃料电池事业联合体”;2014 年规划设立“欧洲共同利益重要项目”,在 5~10 年内投资氢能项目 50~600 亿欧元;2019 年 12 月提出《欧洲绿色协定》,提及发展氢能的重要作用;2020 年 7 月发布《气候中性的欧洲氢能战略》,制定氢能发展“三步走”路线图,规划 2024 年、2030 年绿氢产能分别达到 6 GW/a、40 GW/a,产量分别达到 100×10^4 t/a、 $1\,000 \times 10^4$ t/a;2030 年以后将绿氢部署到各个难以实现脱碳化的行业中。欧盟氢能倡议已吸纳欧盟 26 个成员国,另外,14 个欧盟成员国制定政策,以氢能替代化石能源。欧盟从吸纳投资、市场监管、科技研发、基础设施投入等多方面制定了一系列产业扶持政策。在运输环节,欧盟致力于构建氢气干线管网,便利氢气远距离运输,德、奥、法、荷、比、卢等

国能源部长共同强调加大氢气运输基础设施投资^[14]。

3.1.2 英国

英国未来30年在能源领域至少投资2700亿欧元,其中油气生产投资800亿欧元(含弃置费);海上风电投资600亿欧元,新建产能75 GW;CO₂捕捉、收集、CCUS投资600亿欧元;绿氢投资700亿欧元,与其他三项投资基本持平。推进北部城市燃气全部改为氢,用于家庭和工厂供热^[15]。

3.1.3 荷兰

荷兰欲抢在世界之前推进氢发电,计划到2023年将北部Nuon Magnum发电站的燃料从天然气改为氢气,将CO₂排放量由130×10⁴ t/a减少到几乎为零。

3.1.4 德国

德国举全国之力推进氢能利用,2018年6月氢动力列车试运行,属世界首列;同年12月发布了推进氢与燃料电池技术引进支援计划“Highland project”,成立统一管理产学研(企业、学校、政府)的氢能技术研发和政策制定机构,快速构建社会普及、产学研携手开发氢能技术的体制,主导氢能国际竞争;2020年6月发布《国家氢能战略》,以发展绿氢为重点,打造氢能技术全球领导者,同月公布大规模经济复苏计划,1300亿欧元中的90多亿欧元用于发展氢能。为实施庞大的绿氢计划,德国还计划创造条件促进可再生能源有效利用,例如对制氢用电免税、扶持绿氢制备工业、促成绿氢制备商与天然气生产和利用商或电网运营商探讨新的合作模式等。为了激励电解制氢企业扩大规模,德国出台《管网扩展促进法修正案》,允许运营商建立大规模储能设施,促进氢能产地与消费地连通^[16]。

3.1.5 韩国

韩国出台《氢经济发展路线图》,支持研发氢燃料电池,开展试点示范,推进多领域应用,使氢在电力部门和运输部门更有竞争性。2020年1月开创性地对氢能予以立法,为路线图有效实施提供法律依据^[17]。

3.1.6 日本

日本政策推动力度更大,2013年把发展氢能提升为国策,第四版《能源基本计划》将氢能与热能、电能并列,成为核心二次能源,并提出“氢能社会”概念,以确保能源安全,摆脱能源困境。2014年成立氢能/燃料电池战略协会,公布《氢能/燃料电池战略发展路线图》,详细描述了氢能研发推广的三大阶段及战略目标。2017年和2019年先后制定氢能基本战略和氢能利用进度表,明确2025年前快速扩大氢能使用范围,使氢燃料电池汽车价格降至与混合动力汽车价格持平;到2030年全面引入氢发电和建立大规模氢能供应系统,投运900座加氢站,不断降低供氢成本,促其比传统能源更经济;2040年起,确

立零碳供氢系统。2019年9月出台《氢能和燃料电池技术开发战略》,重点发展燃料电池、氢能供应链和电解水三大领域。为促进燃料电池普及使用,日本对燃料电池车购买、家庭用燃料电池系统以及加氢站建设均进行补贴。对外,日本提出以其为主导开展国际合作,实现全球化氢能社会;发展氢气制造、储运和终端利用全产业链技术,并向全世界推广。在国际上,日本积极推介燃料电池和氢能经济合作计划,从政府层面制定国际合作激励措施,同时尽可能多地制定国际标准^[18]。

日本在技术研发、氢能利用和降低成本方面多管齐下。

在技术研发方面,重点开展对氢燃料电池、氢气液化与船运、“氢脆”问题等的研究^[19]。九州大学久保田祐信教授带领团队深入研究“氢脆”问题,着手研究四大方向:1)在氢气中混合其他气体,使其不容易发生“氢脆”反应;2)研发不容易发生“氢脆”反应的金属新材料;3)加氢站中输氢管焊接处金属不易发生“氢脆”反应的研究;4)疲劳限度研究等。

在氢能利用方面,2025年全面普及氢能交通,扩大氢能发电、工业和家庭应用。氢燃料电池汽车年产量到2025年将达到20万台,到2030年应达到80万台;缩小该型车与混合动力轿车的价格差,到2025年使二者价格相当,氢燃料电池价格由2万日元/kW降至0.5万日元/kW,氢系统价格由70万日元降至30万日元。氢燃料电池公共汽车年产量到2030年将达到1200台,2025年前实现单车价格减半,由目前的1.05亿日元降至0.525亿日元。已着手开展小型卡车实证研究,进行200 km左右近距离运输(采用高压气罐)、500 km左右远距离运输(采用液氢罐)中氢燃料电池技术研发。日本加氢站目前已建成100多座,到2025年计划增至320座,到2030年再增至900座;2025年加氢站建站投资由3.5亿日元降至2亿日元,运营费由3400万日元/a降至1500万日元/a;氢气压缩机由9千万日元降至5千万日元,蓄压器由5千万日元降至1千万日元。2030年实现氢能发电商业化,2025年实现电网平价,低压、高压发电设备投资分别降至50万日元/kW、30万日元/kW,成本分别降至25日元/kW、17日元/kW·h,基本接近液化天然气发电成本15日元/kW·h;2025年发电效率55%以上,之后进一步达到65%以上,耐久性由9万h增至13万h。氢燃料电池家用发电设施由27.4万台增长到2030年的530万台;固体高分子型氢燃料电池价格降至80万日元,固体氧化物型氢燃料电池价格降至100万日元。

在降低成本方面,2030年氢气价格要降至30日元/Nm³,之后进一步降至20日元/Nm³;提高氢能储运液化效率,由13.6 kW·h/kg降至6 kW·h/kg。绿氢生产成本由

20 万日元 /kW 降至 5 万日元 /kW; 耗能由 $5 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{Nm}^3$ 降至 $4.3 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{Nm}^3$ [20]。

3.2 主要国家及其企业竞相付诸具体实施

目前, 大约 94% 的氢来自于化石能源, 其中由天然气、石油和煤炭制氢的比例分别为 54%、31% 和 9%, 绿氢占比不超过 6%。一年多以前, 全球氢气产能只有 3.2 GW/a , 拟建产能 3.5 GW/a ; 如今拟建产能猛增到 26 GW/a , 其中 $2/3$ 在欧洲, 其余成规模的项目主要在沙特和澳大利亚。到 2030 年, 欧盟再新增 40 GW/a 。到 2050 年, 氢燃料电池汽车占全球机动车的 20% ~ 25%; 氢可望替代一次能源 $14 \times 10^8 \text{ t}$, 占全球能源消费的 18% 左右; 绿氢产能可望达到 $1\,000 \text{ GW/a}$, 占全部氢产能的 75%; 产能投资可达到 1 万亿美元, 与以往投资 3.65 亿美元相比, 将会成数千倍地增长。

德国是全球绿氢制备的龙头, 占有全欧洲 36 个在产电解制氢项目中的 18 个, 计划到 2030 年绿氢产能达到 5 GW/a , 10 年间产能增长 200 倍; 到 2040 年再新增 10 GW/a 。德国已经宣布 2 个项目, 产能规模均增加到 $10 \sim 20 \text{ MW}$, 另有 3 个 100 MW 的项目正在酝酿中。德国通力打造绿氢市场, 并以国内市场促动国外市场, 在国际上推广氢能技术和氢能利用, 以期促进成本下降, 实现规模化和技术进步良性循环, 从而增强氢能竞争力。德国拟在摩洛哥等国投资 20 亿欧元建设大型绿氢制备厂 [21]。

各国企业也纷纷采取行动。2017 年全球氢能理事会成立后, 会员不断增多, 多个行业大企业表现了广泛的兴趣, 包括汽车制造商 BMW、GM 和 Honda, 电力和公用煤气公司 Engie、EDF, 设计公司 Bosch、Alstom, 油气公司 Aramco、Shell、BP、Total 和 Equinor, 以及金融企业等。德国企业最为积极, 绿氢生产技术领先、企业众多, 有 Linde 和 Green Hydrogen 这样知名的碱液电解槽企业, 有西门子、和 H-TEC 这样的质子交换膜电解槽企业, 还有 Sunfire 公司这样走在世界前列的固体氧化物电解槽企业。德国 VNG 等 4 家企业合作, 靠近一化工厂建 40 MW 风力发电站, 配套建设电解槽和管道。德国电网企业 Amprion 和天然气管道企业 OGE 合作, 投资 1.5 亿欧元, 在该国西北部建设 100 MW 电解槽, 配套建设专用氢气管道, 预计 2023 年投产。丹麦海上风电商 Ørsted 公司与挪威化肥集团 Yara 拟合资在荷兰建设一个 100 MW 风电电解制氢产氨项目, 可望 2024—2025 年投产。另外, 德、法天然气管道企业正商讨首条跨境运氢管道。最近, 英国 BP 公司和丹麦 Ørsted 公司签署了 LoI (赔偿保证书), 拟合作建设一座工业规模的电解制氢项目, 初始将在 BP 产能 1 万桶 /d 的 Lingen 炼厂建 50 MW 电解装置及相应的基础设施, 以氢替代 20% 的天然气, 由 Ørsted

风电公司提供电力, 2022 年早期完成最终投资决定 (FID), 2024 年投产。

日本企业行动更为超前。其燃料电池商业化利用全球领先, 主要有燃料电池及汽车、燃料电池热电联供固定电站 (家用)。其热电联供系统厂商有东芝、松下和爱信精机三家, 其产品发电效率可达 40%, 总效率高于 90%; 启动时间 $1 \sim 2 \text{ min}$, 耐用时间 8 万 h 以上; 并根据需要可并入电网。用户使用 ENE-FARM 系统每年可节省的照明和取暖费用约 6 万元。ENE-FARM 全球销量至 2017 年 5 月已突破 20 万套, 计划 2030 年前达到 530 万套。在燃料电池车方面, 丰田和本田两家公司发展较为成功, 丰田燃料电池汽车 (FCV) 燃料电池 4 座商业车 Mirai 于 2014 年 12 月上市, 百公里加速时间约为 10 s , 最大续航里程超过 700 km , 补充氢燃料 3 min; 2015 年、2016 年、2020 年产量分别达 700 辆、2 000 辆、30 000 辆; 2020 年底上市 FCV 燃料电池车 Mirai 未来新车型, 该型车将燃料电池和蓄电池有效结合, 实现燃料电池和发电机组的相互配合, 从而降低成本; 2025 年前让燃料电池车售价降至 2 万美元左右。通过提高发电效率, 一次加氢可行驶的距离更长 [22]。丰田公司还为东京奥运会及残奥会引进燃料电池大巴 (FCB) 100 多辆。本田 FCV 燃料电池 5 座商业车 Clarity 于 2016 年 3 月上市, 最大功率 100 kW (136 PS), 最大续航里程 700 km , 补充氢燃料 3 min。氢燃料电池车比传统汽车贵, 仰赖日本政府补贴。丰田、本田售价 670 万日元 / 辆、709 万日元 / 辆的燃料电池车可获得补贴 202 万日元 / 辆、208 万日元 / 辆。制氢方面, 基地设在横滨的日本最大石油批发商 JXTG 控股公司利用液化石油气 (LPG) 为原料生产氢, 在全国 41 个加氢站向燃料电池车供应氢, 在日本能源行业举起了氢能利用大旗。位于福岛浪江町棚盐产业团地的福岛氢能研究基地是亚洲最大的制氢工厂, 每小时生产氢气 $2\,000 \text{ m}^3$, 年产能 900 t, 可以满足 1 万辆氢能汽车一年的氢能所需。未来还可能将自身氢能发电融入东北电力公司的电网。氢气液化运输方面, 日本川崎重工制造的全球首艘液氢运输船 “SUISEI FRONTIER” 2019 年 12 月 11 日下水。该船将在澳大利亚制成的液氢 (褐煤制氢冷却至 $-253 \text{ }^\circ\text{C}$ 超低温、体积压缩到 $1/800$) 运送到日本神户, $9\,000 \text{ km}$ 路程需花费 16 d, 每三个月运输一趟。

3.3 技术进步和规模化效应正快速推动成本下降

时下, 国际上蓝氢的成本在无 CCS 情况下, 大约 $1 \sim 2 \text{ 美元 / kg}$; 如与 CCS 配套, 则另加 50 美分。绿氢的成本比蓝氢成本要高得多。到 2030 年, 绿氢投资成本可望下降 $1/3$, 特别是当电解制氢实现过程自动化, 原料成本下降 5%, 电解效率提高 8%, 成本完全能实现下降 $1/3$ 的目标。规模扩大可使单位成本大大下降, 例如, 如果欧

洲绿氢制备现有的32 MW产能扩大到250 MW以上,那么电解的投资成本就可以削减40%。当然,整个氢能产业成本的大幅度下降还需仰赖产业链各个环节技术创新,如质子膜、催化剂、氢能汽车等技术创新,及管道输送中氢脆问题的解决等^[23]。

3.4 碳税调节既推动氢能利用又增强绿氢竞争能力

世界各国纷纷开征碳税并有不断提高税率趋势,加拿大表现尤为明显。这一方面在很大程度上促使终端用户放弃化石能源消费,转而使用氢能;另一方面会增加灰氢和蓝氢的成本,使其与不断降低的绿氢的成本逐步接近^[24]。据预测,到2040年,灰氢成本可能因碳税征收上升82%;与此同时,绿氢成本因技术进步、规模效应和电价优惠,可望下降64%。到那时,美国、欧盟和澳大利亚绿氢成本与灰氢成本基本相当,其中德国可能会在2030年提前达到两者成本相当^[25]。

4 中国氢能发展已起步

2011年以来,中国陆续出台政策,鼓励和引导发展氢能:1)2019年政府工作报告首次明确“推进加氢等设施建设”;2)《中华人民共和国能源法(征求意见稿)》一改以往将氢能定性为危险品的惯例,首次将氢能纳入能源范畴;3)多部委联合发布《关于完善新能源汽车推广应用财政补贴政策的通知》,对示范城市予以奖励,以奖代补;4)计划4年内形成燃料电池汽车产业链;5)开展基础研究,努力掌握核心关键技术;6)利用庞大市场,参与世界氢能市场强力竞争。

与此同时,区域发展如火如荼,2019年《长三角氢能与燃料电池产业创新发展白皮书》发布;珠三角、长三角、京津冀地区及山东、海南、湖北、四川等30多个省、市制定了氢能发展支持政策,迄今各地已发布氢能产业政策160多个、标准近70项。珠三角、长三角、京津冀、中部地区和山东半岛等氢能产业集群和示范利用已初步形成^[26]。

4.1 上海

上海相继推出《长三角氢走廊建设发展规划》《上海市燃料电池汽车发展规划》及推广应用财政补助方案、《临港新片区综合能源建设三年行动计划(2020—2022年)》,成立上海自贸区临港新片区氢产业园。这三年将聚焦培育“一环”“六带”氢燃料电池汽车产业创新生态,沿“外环”布局燃料电池汽车产业链,重点建设嘉定、临港新片区、青浦、金山、浦东、宝山6个燃料电池汽车产业集聚带^[27]。到2023年实现“百站、千亿、万辆”目标。规划加氢站接近100座,投运30座,产值近千亿元,推广氢燃料电池汽车1万辆。上海拥有丰富的氢能产业链资源,有23条氢燃料电池电堆产业链、21条制氢产业链、

18条加氢站产业链、11条氢燃料电池系统产业链等,已建成投运加氢站7座,先发优势明显^[28]。由此,2020年7月上海以75.84分的成绩登上势银(TrendBank)“中国氢能城市竞争力排行榜”榜首,独占氢能发展鳌头。江苏苏州和广东佛山紧随其后。

4.2 苏州

苏州从事氢能产业创新发展的企业超过70家,涵盖氢能全产业链。钢铁冶金、能源化工、港口物流、装备制造等领域的产业基础基本覆盖了氢能制取、储运、加注、应用等环节。国富氢能、华昌能源、中车氢能、重塑科技等重点氢能产业项目60多亿元投资相继落户苏州。所属张家港和常熟成为氢能先导核心区,氢能配套产业链基本形成,拥有发展氢能五大优势:氢气资源供给充足,企业集聚效应明显,创新平台优势突出,示范应用场景丰富,支持政策高度聚焦。沙钢集团、东华能源、华昌化工等钢铁、石化、合成氨企业的工业副产氢有近 30×10^4 t,同时还拥有法液空、金宏气体、梅塞尔气体等一批售氢企业。张家港市已开辟5条公交线路,投运35辆氢燃料电池公交车,投放80辆氢燃料电池物流车。常熟市建成丰田汽车研发中心加氢站,常嘉氢加氢站已建成并试运营,日加氢能力达1 000 kg;同时开辟1条公交线路,首批20辆氢燃料电池公交车投入运行,120辆氢燃料电池物流车上牌投运。2021年2月发布《苏州市氢能产业发展白皮书》。

4.3 佛山

佛山率先出台一系列产业规划和政策,进行市区两级规划,出台《促进新能源汽车产业发展扶持办法》《加氢站建设运营及氢能源车辆运行扶持办法》;以仙湖氢谷为核心建设国际一流的氢能产业园区,布局了仙湖氢谷、现代氢能有轨电车修造基地等多个氢能产业基地^[29];打造一批氢能产业研发、标准化平台,已建立多个氢能产业研发平台;投用氢燃料电池汽车440辆,其中公交车11辆、物流车426辆、轻客车3辆,推广规模超千辆,投入运营10条以上氢能燃料电池汽车公交专线;聚集了20多家氢能企业,形成完整的氢能产业链,计划投资近200亿元,可望形成千亿元产值/年的产业集群;已建成加氢站20多座,在建近10座^[30]。

4.4 中央企业

中央企业积极发展氢能产业。神华集团、国家电网、东方电气、中国石油、中国石化、中国中车、中船重工等企业集团都结合自身优势,选择性进入氢能产业。大部分企业选择发展氢燃料电池;设备制造企业选择开发氢燃料电池汽车并配套开发燃料电池,实施后段一体化发展;化石能源丰富的企业选择制氢和建设加氢站,实施前段一体化发展,其中中国石油和中国石化等加油站

分布广的企业,积极建设油氢合建站^[31]。中国石化氢气总产能已达到 $350 \times 10^4 \text{ t/a}$;依托现有炼化企业的富产氢气资源,在北京、广东、上海等地已建成 $9\,000 \text{ kg/d}$ 的高纯氢供应能力,正在布局可再生能源制绿氢;已建成10座油氢混合加氢站,东北首座“油气氢电非”五位一体综合能源服务站2021年2月23日在大连投入运营。未来将以京津冀、长三角、珠三角为重点,以码头港口、物流枢纽、高速公路氢走廊为依托,大规模布局建设加氢站,五年内建成加氢站1 000座。中国石油除已投入运营的崇礼太子城加氢站外,在上海首座油氢合建站于2020年9月奠基,2021年上半年建成。另外,崇礼北油氢合建站、北京福田加氢站和金龙油氢合建站都将在年内投运,未来还将在全国布局数量可观的加氢站。

目前中国氢气产能大约 $2\,500 \times 10^4 \text{ t/a}$;在运、在建加氢站130多座;运行燃料电池汽车近4 400辆^[32]。氢产能、加氢站和燃料电池汽车均具备一定规模,但制备和利用基本是蓝氢、灰氢和棕氢(褐氢)。

根据hydrogen council数据,到2030年,全球对氢能的需求将达到14 EJ;到2040年翻倍到28 EJ;到2050年将再翻数倍。按照以上比例换算,2030年氢气需求达到 $9\,800 \times 10^4 \text{ t}$ ($1.092 \times 10^{12} \text{ m}^3$),2040年需要 $1.96 \times 10^8 \text{ t}$ ($2.184 \times 10^{12} \text{ m}^3$)。

5 对策建议

面对全球氢能利用汹涌发展势头,国家层面、产业层面、地方政府层面、企业层面、融资领域和公众等,都既要积极拥抱、大力支持这一新事物,又要小心论证、谨慎决策具体项目。

5.1 国家层面要构筑好发展氢能的良性机制

中国在发展氢能方面做过不少工作,已经有了较好基础,但要博采众长,与日、德之强项比,还有不小改进空间。一是规划要超前,着眼于30年以后,看趋势定目标,据实际分阶段。二是布局要全面,氢能利用全产业链的方方面面都要顾及,政策、标准既要衔接好氢能利用各个环节,又要衔接好其他能源、其他相关行业。三是核心要抓准,短板要补齐。氢能利用的瓶颈在于技术和成本,攻科技、降成本就需要大力促进,同时用好政策工具,开征碳税、加重补贴,将能源利用的外部性内部化,促使氢能成本与化石能源成本处于可比较水平;让新生事物得到扶植,促使氢能、燃料电池汽车等能与传统能源、传统汽车相比处于竞争优势地位。

5.2 加快构建上中下游完整的“氢气工业”

从制氢、运氢到氢能多方式利用,整个氢气工业上

中下游产业链,中国大多数都有涉猎,但发展仍处于试点示范阶段,仅局限在少数地区,发展总量也比较有限,需要加快发展。氢能发展价值链各环节有强有弱,例如燃料电池汽车制造、质子交换膜攻坚、加氢站氢气灌注机替代、氢气管输中氢脆难题的克服等等,都需要赶上世界先进水平。而且中国氢能利用仍有空白环节,例如家用氢能热电联供系统,海外制氢、运氢等,我们还都是空白,要探索、要发展。

5.3 地方政府要积极发展与慎重论证并重

同中央政府一样,地方政府规划和政策措施要谋划好,自不待言。值得提醒的是,氢能利用早期在经济性上存在一定风险,地方政府既要考虑氢能来源,避免以自己的“劳师远征”去与竞争者的“就地取材”争高低。还要考虑财政能力,避免出现“以奖代补”硬撑不下去而导致满地尽是“半拉子工程”的局面。因此,发展氢能地方政府不能蜂拥而上,而要因地制宜、循序渐进、充分论证、量力而行。

5.4 企业要积极付诸转型行动,占据氢能先机

能源、汽车等相关企业,尤其是传统油气能源企业,一定要看到氢能利用的发展态势和光明未来,积极行动起来,投入能源转型大潮中,尤其要重视发展氢能源。

对传统油气能源企业而言,氢能与其它各类能源之间的关系、氢能利用的方式、氢能利用产业链上各个环节的技术前沿、氢能利用的瓶颈及其解决办法等种种前沿问题都亟待研究探讨,因此有必要以举办专题讲座、培训班、咨询讨论会、现场考察学习等方式,进行知识和信息普及,让各级领导干部及从业人员掌握氢能发展的前沿状况,紧跟新能源时代步伐。

在审视企业现有资源、现有优势和劣势基础上,合理定位,认清企业自身最适合全产业链发展还是部分环节发展,是进行前段一体化发展还是后段一体化发展,是发展氢燃料电池、氢能源汽车还是发展加氢站、致力氢能源运输。目前企业恰逢“十四五”新能源规划尚未定型、正在起步实施之时,相关企业应力争将氢能源作为本企业能源转型和实现“双碳”目标的核心业务之一,列入五年重点发展规划,为中国如期实现既定能源目标做出新贡献^[33]。

其他如金融业,要大力倡导和实施“能源金融”,为绿色能源氢能产业发展积极提供融资支持。

公众也需要积极行动起来,尝试氢能源、支持新事物。大胆尝试家用燃料电池汽车、家用燃料电池热电联供系统,偏好选择氢能源公交,为绿色氢能发展贡献一份力量。

参考文献:

- [1] 夏金彪. 氢燃料新能源车商业化之路不平坦[N]. 中国经济时报, 2020-09-10(002).
XIA Jinbiao. The commercialization road of hydrogen-driven vehicles is uneven [N]. China Economic Times, 2020-09-10 (002).
- [2] 前瞻产业研究院. 燃料电池产业分析[J]. 电器工业, 2020(9): 20-25.
Forward-looking Industry Institute. Analysis on the fuel cell industry [J]. China Electrical Equipment Industry, 2020 (9): 20-25.
- [3] 陈英杰. 天然气制氢技术进展及发展趋势[J]. 煤炭与化工, 2020, 43(11): 130-133.
CHEN Yingjie. Technology progress and development trend of hydrogen production from natural gas [J]. Coal and Chemical Industry, 2020, 43 (11): 130-133.
- [4] 刘 群, 张红林, 官思发, 等. 发展氢能产业的调研与思考[J]. 高科技与产业化, 2020(10): 59-63.
LIU Qun, ZHANG Honglin, GUAN Sifa, et al. Investigation and thoughts on hydrogen energy industry's development [J]. High-Technology & Commercialization, 2020 (10): 59-63.
- [5] 吴锋棒. 风光氢储综合能源系统优化配置[J]. 山东化工, 2020, 49(16): 135-136.
WU Fengbang. Optimized configuration of wind-solar hydrogen storage integrated energy system [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49 (16): 135-136.
- [6] 江 榕, 冯芸清. 避重就“氢”会成未来趋势吗? [J]. 环境, 2020(10): 45-47.
JIANG Rong, FENG Yunqing. Is hydrogen going to be a future trend? [J]. Environment, 2020 (10): 45-47.
- [7] Wood Mackenzie. The edge: future energy-green hydrogen [DB/OL]. [2021- 01-18]. <https://my.woodmac.com/document/382857>.
- [8] IHS Markit. Europe's "greening" long-term gas balance [DB/OL]. [2021- 01-25]. <https://connect.ihsmarkit.com/document/show/phoenix/3792522?connectPath=Search&searchSessionId=e95a77ff-d2bd-4aab-af75-ab0844be092a>.
- [9] 莫愁乐. 加氢站氢气成本分析[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2020, 40(17): 23-24.
MO Choule. Cost analysis on the hydrogen of hydrogen refueling station [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40 (17): 23-24.
- [10] 骈 松, 孙邦兴, 杨 华. 基于可再生能源纯水电解制氢技术展望[J]. 山东化工, 2020, 49(15): 64-65.
PIAN Song, SUN Bangxing, YANG Hua. Prospect of hydrogen production by electrolysis of pure water based on renewable energy [J]. Shandong Chemical Industry, 2020, 49 (15): 64-65.
- [11] Wood Mackenzie. Energy pulse: the promise of green hydrogen [DB/OL]. [2021- 01-18]. <https://my.woodmac.com/document/442912>.
- [12] IHS Markit. Hydrogen and renewable gas: Reshaping the long-term role for gas [DB/OL]. [2021- 01-24]. <https://connect.ihsmarkit.com/document/show/phoenix/2698543?connectPath=Search&searchSessionId=51429b46-b276-4000-981b-a8ad2c647214>.
- [13] 李彩球. 氢能——引领能源消费革命生力军[J]. 中国电力, 2020(9): 64-67.
LI Caiqiu. Hydrogen: new dynamo to lead energy consumption revolution [J]. China Electric Power, 2020 (9): 64-67.
- [14] 姚春妮, 刘幼农, 马欣伯. 氢能解决建筑用能的初步探索与研究分析[J]. 建设科技, 2020(15): 21-24.
YAO Chunni, LIU Younong, MA Xinbo. Preliminary exploration and analysis on using hydrogen energy as building energy [J]. Construction Science and Technology, 2020 (15): 21-24.
- [15] Wood Mackenzie. The Edge: building a net-zero energy system [DB/OL]. [2021- 01-18]. <https://my.woodmac.com/document/440765>.
- [16] 赵洪雪, 李 泉, 庞知非, 等. 氢燃料电池汽车发展现状浅析[J]. 交通节能与环保, 2020, 16(4): 11-15.
ZHAO Hongxue, LI Xiao, PANG Zhifei, et al. Analysis on current development of fuel cell vehicles [J]. Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation, 2020, 16 (4): 11-15.
- [17] 孟翔宇, 顾阿伦, 郭新国, 等. 中国氢能产业高质量发展前景[J]. 科技导报, 2020, 38(14): 77-93.
MENG Xiangyu, GU Alun, WU Xinguo, et al. Foreground of China's hydrogen industry high-equality development [J]. Science & Technology Review, 2020, 38 (14): 77-93.
- [18] 杨 智, 刘丽红, 李 江. 氢能源产业技术标准化发展现状[J]. 船舶工程, 2020, 42(增刊1): 39-49.
YANG Zhi, LIU Lihong, LI Jiang. Development status of standardization of hydrogen energy industry technology [J]. Ship Engineering, 2020, 42 (Suppl 1): 39-49.
- [19] IHS Markit. Hydrogen: The new supply spectrum [DB/OL]. [2021- 01-23]. <https://connect.ihsmarkit.com/document/show/phoenix/872155?connectPath=Search&searchSessionId=2c6ee522-fbd8-441b-8c69-7b405431b425>.
- [20] 苏海河. 日本“脱碳”之路不平坦[N]. 经济日报, 2020-12-15(005).
SU Haihe. Japan's decarbonization road is uneven [N]. Economic Daily, 2020-12-15 (005).
- [21] 中国节能网. 世界能源技术创新方向及发展趋势[J]. 有

- 色冶金节能,2020,36(4):3-9.
- CES. CN. Innovation direction and development trend of world energy technology [J]. Energy Saving of Nonferrous Metallurgy, 2020, 36 (4): 3-9.
- [22] 潘光胜,顾伟,张会岩,等.面向高比例可再生能源消纳的电氢能源系统[J].电力系统自动化,2020,44(23):1-10.
- PAN Guangsheng, GU Wei, ZHANG Huiyan, et al. Electricity and hydrogen energy system towards accommodation of high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44 (23): 1-10.
- [23] 李争,张蕊,孙鹤旭,等.可再生能源多能互补制—储—运氢关键技术综述[J].电工技术学报,2020,35(23):225-235.
- LI Zheng, ZHANG Rui, SUN Hexu, et al. Review on key technologies of hydrogen generation, storage and transportation based on multi-energy complementary renewable energy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35 (23): 225-235.
- [24] 钱伯章.氢正逐步走向能源舞台的中央?[J].石油知识,2020(5):42-43.
- QIAN Bozhang. Is hydrogen going to the center of energy stage? [J]. Petroleum Knowledge, 2020 (5): 42-43.
- [25] Wood Mackenzie. Energy transition outlook 2020: highlights [DB/OL]. [2021-01-18]. <https://my.woodmac.com/document/437167>.
- [26] 王虹,梁雪莲,陈庆奎.氢能产业政策研究[J].煤气与热力,2020,40(7):27-31.
- WANG Hong, LIANG Xuelian, CHEN Qingxi. Research on Hydrogen Industry Policy [J]. Gas & Heat, 2020, 40 (7): 27-31.
- [27] 汽车信息.上海积极引入氢能源汽车产业项目[J].重型汽车,2020(5):1.
- Vehicle Information. Shanghai introduced hydrogen energy vehicle industry project [J]. Heavy Truck, 2020 (5): 1.
- [28] 曲绍楠.加氢站的上海样本[J].中国石油石化,2020(20):18-21.
- QU Shaonan. Shanghai sample of hydrogen refueling station [J]. China Petrochem, 2020 (20): 18-21.
- [29] 魏调忠.氢能源与超级电容在现代有轨电车的应用[J].机电工程技术,2020,49(9):185-187.
- WEI Diaozhong. Application of hydrogen energy and super capacitor on modern tram [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2020, 49 (9): 185-187.
- [30] 欧阳兆龙,陈满光,张小川.创新驱动下的城镇生态文明建设路径探索——以佛山市南海区丹灶镇仙湖氢谷概念规划为例[J].城乡建设,2020(22):14-17.
- OUYANG Zhaolong, CHEN Manguang, ZHANG Xiaochuan. Path exploration on the urban ecological civilization construction under innovation-driven: taking the planning of hydrogen valley and Xian Lake, Danzao Town, Nanhai District, Foshan City as an example [J]. Urban and Rural Development, 2020 (22): 14-17.
- [31] 郑雪芹.氢能产业发展助推能源革命,我国燃料电池技术频现突破[J].汽车纵横,2020(9):52-53.
- ZHENG Xueqin. Hydrogen energy industry's development boosts energy revolution, and China's fuel cell technology appears frequent breakthrough [J]. Auto Review, 2020 (9): 52-53.
- [32] 李忠于,黄伟,张楚璠.燃料电池用高纯氢纯化技术研究进展[J].能源化工,2020,41(5):1-7.
- LI Zhongyu, HUANG Wei, ZHANG Chupan. Research progress on high purity hydrogen purification technology for fuel cell [J]. Energy Chemical Industry, 2020, 41 (5): 1-7.
- [33] IHS Markit. China's clean energy development plan: What does it mean for natural gas [DB/OL]. [2021-01-20]. <https://connect.ihsmarkit.com/document/show/phenix/3852080?connectPath=Search&searchSessionId=3627dc92-8156-4f98-aa9a-1aaac98a08d2>.