

2060 碳中和



徐连兵 高级工程师
国家能源投资集团
有限责任公司

徐连兵,高级工程师,国家注册咨询工程师(投资),清华大学热能动力工程专业毕业,工学硕士,现任国家能源集团山东电力有限公司总经理,历任中国国电集团公司计划发展部项目发展处副处长、处长、计划发展部副主任,国家能源集团科技部副主任。具有丰富的宏观规划、项目开发、基建投资、科技创新等管理经验。长期致力于低碳、零碳技术研究与工程实践,对氢能、氨能的技术发展与应用推广有深入研究。主持完成国家能源集团 2021 年十大重点科技项目“大型燃煤锅炉混氨燃烧技术研究与示范”等多项省部级科技项目。参与“大型煤电化基地固废规模化利用成套技术及集成示范”等多项国家重点研发计划项目,参与中国工程院重大咨询项目“中国氢能源与燃料电池发展战略研究”。参与编制《火力发电厂可行性研究报告内容深度规定》等 4 项国家标准,获国家能源集团科技进步一等奖 2 项。

我国氢能源利用前景与发展战略研究

徐 连 兵

(国家能源投资集团有限责任公司,北京 100011)

摘 要:在全球能源向清洁化、低碳化、智能化发展的趋势下,发展氢能源产业已成为当前能源技术变革的重要方向,对我国实现新时代能源转型意义重大。基于此,对我国氢能源利用前景与发展战略开展系统研究。首先,结合我国氢能源产业链特点,从制氢、储氢、用氢等方面阐述了我国氢能源发展现状,在制氢方面,我国每年氢气产能约 4 100 万 t、产量约 3 342 万 t,是全球最大的产氢国;在氢气储运方面,由于应用规模小、技术装备水平低等因素,我国氢能源运输能力建设严重滞后,与国外存在显著差距;在加氢站建设方面,我国已建成运营加氢站 127 座,加氢站的设计、建设以及三大关键设备均实现国产化;在用氢产业方面,我国在交通领域、发电领域以及其他信息领域得到一定程度的商业化应用,特别是氢燃料电池产业得到快速发展。其次,对我国氢能源利用存在主要问题进行了深入分析,认为当前我国氢能源产业集群发展初见成效,但与国际氢能源发展相比,我国氢能源开发利用面临严峻挑战,特别是在燃料电池技术发展、氢能源产业装备制造等方面,缺少立足长远的国家氢能源发展战略与综合规划,亟待从发展战略与规划、基础研究、应用研究、产品开发、规范标准、性能测试、技术实证、商业创新等方面全面研究与布局。最后,对我国氢能源利用前景与应用场景进行系统分析,提出推进氢能源利用的战略举措和建议:在战略举措方面,一是要契合国家战略,坚持规划引领,做好氢能源产业发展战略规划;二是要突出平台效应,协同创新发展,发挥好各类核心氢能源产业化平台作用;三是要加强科技创新,深化产学研合作,加强协同创新,充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用;四是健全人才机制,打造核心优势,充分调动科技人员的积极性和创造性。在政策建议方面,需进一步强化氢能源在国家能源体系中的重要地位,加强核心技术自主研发与技术标准体系建设,因地制宜选择氢能源产业发展路线,并适当引导国有资本在氢能源产业的优化布局,确保我国氢能产业的健

收稿日期:2022-02-25;责任编辑:常明然 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CN22022501

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2019YFC1904300);中国工程院重大咨询研究资助项目(2019-ZD-3)

作者简介:徐连兵(1973—),男,山东日照人,高级工程师,硕士。E-mail:12000033@chnenergy.com.cn

引用格式:徐连兵.我国氢能源利用前景与发展战略研究[J].洁净煤技术,2022,28(9):1-10.

XU Lianbing.Research on the prospect and development strategy of hydrogen energy in China[J].Clean Coal Technology, 2022,28(9):1-10.



移动阅读

康持续发展。

关键词: 氢能源利用;加氢站;燃料电池;战略举措;政策建议

中图分类号: TQ028.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-6772(2022)09-0001-10

Research on the prospect and development strategy of hydrogen energy in China

XU Lianbing

(National Energy Investment Group Co., Ltd., Beijing 100011, China)

Abstract: Under the trend of global energy development towards clean, low-carbon and intelligent development, the development of hydrogen energy has become an important direction of the current world energy technology transformation in the world, and it is of great significance for China to realize the energy transformation in the new era. Based on this, a systematic study was performed on the prospect and development strategy of hydrogen energy utilization in China. Firstly, combining the characteristics of China's hydrogen energy industry chain, the development status of China's hydrogen energy was described from the aspects of hydrogen production, hydrogen storage and hydrogen use. In terms of hydrogen production, China has an annual hydrogen production capacity of about 41 million tons and an output of about 33.42 million tons, making it the world's largest hydrogen producer. In terms of hydrogen storage and transportation, due to the small application scale and low level of technical equipment, the construction of hydrogen energy transportation capacity in China lags behind that in foreign countries. In terms of the construction of hydrogenation stations, China has built and operated 127 hydrogenation stations, and the design, construction and three key equipments of hydrogenation stations have been localized. In terms of hydrogen industry, China has got a certain degree of commercial application in the field of transportation, power generation and other information fields, especially the hydrogen fuel cell industry has developed rapidly. Secondly, the paper deeply analyzed the main problems existing in China's hydrogen energy utilization. At present, the development of China's hydrogen energy industry cluster has achieved initial results, but compared with the international hydrogen energy development, China's hydrogen energy development and utilization is facing severe challenges. Especially in terms of fuel cell technology development, hydrogen energy industry equipment manufacturing, etc., there is a lack of long-term national hydrogen energy development strategy and comprehensive planning. It urgently needs to be analyzed from the perspective of development strategy and planning comprehensive research and layout in basic research, application research, product development, specifications and standards, performance testing, technical demonstration, business innovation, etc. Finally, the prospect and application scenarios of hydrogen energy utilization in China were systematically analyzed, and strategic measures and suggestions to promote hydrogen energy utilization were put forward. In terms of strategic measures, firstly, it is necessary to conform to the national strategy, adhere to the planning guidance, and make a strategic plan for the development of hydrogen energy industry. Secondly, it should highlight the platform effect, coordinate innovation and development, and give full play to the role of various core hydrogen energy industrialization platforms. Thirdly, it is necessary to strengthen scientific and technological innovation, deepen industry university research cooperation, strengthen collaborative innovation, and give full play to the leading role of scientific and technological innovation in overall innovation. Fourth, it is necessary to improve the talent mechanism, create core advantages, and fully mobilize the enthusiasm and creativity of scientific and technological personnel. In terms of policy recommendations, it is necessary to further strengthen the important position of hydrogen energy in the national energy system, strengthen the independent research and development of core technologies and the construction of technical standard system, select the development route of hydrogen energy industry according to local conditions, and properly guide the optimal layout of state-owned capital in the hydrogen energy industry to ensure the healthy and sustainable development of China's hydrogen energy industry.

Key words: hydrogen utilization; hydrogen refueling station; fuel cell; development strategy; policy suggestion

0 引言

党的十九大报告明确提出要加快推进能源生产和消费革命,构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系。氢能源作为最低碳的清洁能源,是实现我国能源结构转型升级,推进能源革命的重要抓手。2019年,氢能源首次写入《政府工作报告》。2020年,国家能源局发布的《中华人民共和国能源法(征求意见稿)》首次将氢能源列入能源范畴,从法律层面明确了氢能源的能源地位^[1]。目前已有数十个地区

发布了氢能源产业发展规划和行动计划,我国氢能源正迎来快速发展的战略机遇期^[2-5]。

氢能源已广泛应用于军事、航天等领域,在民用领域,各国研究应用起伏较大,20世纪70年代已有国家提出“氢经济”的概念,但始终未踏入商业化应用门槛。自2015年《巴黎协定》签署以来,全球节能减排的压力愈发严峻,减少对化石能源的依赖并大力发展清洁能源的诉求愈加高涨,在全球能源向清洁化、低碳化、智能化发展的趋势下,发展氢能源产业已经成为当前世界能源技术变革的重要方向。

美国、日本、德国、韩国、法国等发达国家已将氢能源规划上升到国家能源战略高度,在燃料电池汽车商用及分布式发电应用、军事领域均取得了一定进展^[6-8]。对我国而言,发展氢能源产业可以有效优化能源系统,大幅降低交通运输行业石油与天然气的消费量,降低碳排放和环境污染,对促进新时代能源转型具有重大意义。

鉴于此,笔者基于我国氢能源利用现状,针对氢能源产业发展存在的主要问题,进行氢能源利用的发展条件基本判断与前景分析,提出推进氢能源利用的战略举措和发展建议,为我国氢能源高质量发展提供支撑。

1 我国氢能源发展现状

1.1 制氢发展现状

我国是目前全球最大的产氢国,根据《中国氢能源及燃料电池产业白皮书 2020》的数据^[9],我国每年氢气产能约 4 100 万 t,产量约 3 342 万 t。较为成熟的氢气制取技术路线主要有 3 种:一是以煤炭、天然气为代表的化石燃料制氢;二是以焦炉煤气、丙烷脱氢、氯碱尾气等工业副产气为原料的提纯制氢;三是碱性水电解制氢^[10]。前二者之和占国内制氢产能的 98.5% 左右。电解水制氢(绿氢)产量仅占我国氢气产量的 1.5% 左右。与化石原料制氢产能相比,绿氢的供给能力明显偏低。绿氢制备技术需要在提高能效、降低设备投资方面进一步加大研发力度。

1) 化石燃料制氢技术。我国“富煤缺油少气”的化石资源特点,决定了煤制氢是实现大规模产业化制氢的首选技术。根据中国氢能联盟研究院的数据,2019 年煤制氢产量高达 2 124 万 t,占氢气总产量的 63.55%。水蒸气重整制氢技术(SMR)在天然气制氢技术中发展较为成熟、应用也较为广泛,在我国中部地区(四川盆地、鄂尔多斯盆地)、西部地区(塔里木盆地、柴达木盆地、准噶尔盆地)以及近海区域(渤海湾盆地、珠江口盆地)等天然气资源充足的地方适合发展水蒸气重整制氢技术。

2) 工业副产气提纯制氢技术。变压吸附(PSA)提纯技术是当前提纯工业副产氢的主流工艺,不仅适用于煤气化制氢、天然气重整制氢等化石原料制氢的净化提纯,同样也适用于焦炉煤气、氯碱等工业副产氢提纯,2019 年工业副产氢产量为 708 万 t。

3) 电解水制氢技术。水电解制氢即通过水的电解生产 H_2 ,同时副产 O_2 。2019 年电解水制氢的产量约 50 万 t,电解水制氢产量仅占我国氢气产量的 1.5% 左右。与化石原料制氢产能相比,低碳清洁

氢的供给能力明显偏低。在技术层面,电解水制氢可分为碱水电解(ALK)、质子交换膜水电解(PEM)、固体氧化物水电解(SOEC)和固体聚合物阴离子交换膜(AEM)水电解。比较而言,碱水电解技术作为最成熟的电解水技术,在市场化进程中占据主导地位,碱水电解槽已基本实现国产化。

总体来看,我国制氢主要以煤炭、天然气等化石燃料为主,再加上工业副产提纯制氢,二者之和占国内制氢产能的约 98.5%。电解水制氢(绿氢)产能仅占我国氢气产量的 1.5% 左右。与化石原料制氢产能相比,绿氢的供给能力明显偏低。绿氢制备技术需要在提高能效、降低设备投资方面进一步加大研发力度^[11-15]。

1.2 氢能源储运发展现状

氢气储运是氢能源产业的中间环节,连结着产业链前端的制氢和后端的氢能源利用环节。国内主要采用压缩氢气的方式进行储存和运输,液氢主要作为推进剂用于航天领域,在民用领域基本为空白。

1) 高压气态储氢技术。该技术是目前我国最常用的储氢技术,主要以 20 MPa I 型储氢容器长管拖车进行氢气运输,单次运输 300 kg。储氢罐加压过程成本较高,且随着压力增大,储氢的安全性也会大幅降低,存有泄漏、爆炸的安全隐患,因此进行安全性能提升研究刻不容缓。高压气态储氢还需向轻量化、高压化、低成本、质量稳定的方向发展,探索新型储氢罐材料以匹配更高压力下的储氢需求,提高储氢安全性和经济性。

2) 有机液态储运技术。我国有机液态储氢尚处于示范阶段,但相关领域的发展已有所成就,代表企业如武汉氢阳能源,选用的有机液态储氢材料为氮乙基咪唑,建立了全球第 1 个常温常压液态有机储氢材料工厂。有机液态储氢拥有较大的推广优势,可依托现有传统汽油输送方式和加油站构架建设氢油站,未来技术研究需重点突破相关制备及配套设备技术,提高脱氢效率。

3) 固体材料储氢技术。目前,我国固态储运氢技术水平总体与国际同步,在部分储氢材料与技术的研发和产业化方面具有一定优势,处于小规模示范试验阶段。在材料体系开发方面,已研制出不同储氢容量的固态储氢系统,储氢容量从几升到上千立方米。在示范应用方面,应用领域包括便携式、分布式发电、车载、固定式等不同领域。其中,开发的储氢量 $40 m^3$ 的固态储氢系统与 5 kW 燃料电池系统成功耦合为通信基站备供电,电堆持续运行超 16 h,为固态储氢技术在通信基站备用电源领域的

应用奠定了良好的技术基础。

整体来看,由于应用规模小、技术装备水平低等因素,我国氢能源运输能力建设严重滞后,与国外存在显著差距^[16-17]。

1.3 加氢站发展现状

截至2020年底,我国已建成运营加氢站127座(含内部实验站),具体分布如图1所示。这些加氢站主要以35 MPa为主,占90%以上,也有少数70 MPa加氢站已建成,暂无液氢加氢站。2019年11月建成的江苏如皋加氢站,是国内首个35 MPa/70 MPa国际标准的双模加氢站。从建设类型看,固定式加氢站占比61%左右,撬装式占比39%^[18-19]。

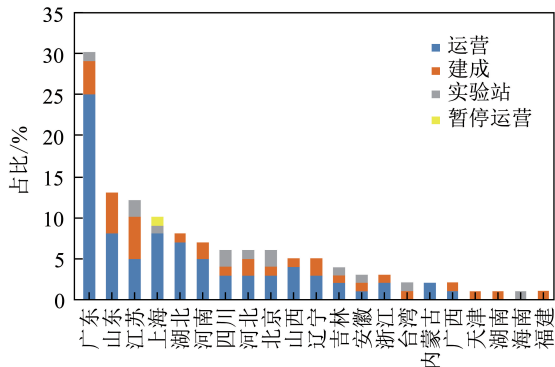


图1 2020年底我国各省加氢站分布情况

Fig.1 Distribution of hydrogen refueling stations in various provinces in China by the end of 2020

我国35 MPa加氢站技术已趋于成熟,加氢站的设计、建设以及三大关键设备:45 MPa大容积储氢罐、35 MPa加氢机整机和45 MPa隔膜式压缩机均已实现国产化。少数企业已拥有加氢站系统控制算法优化与产品集成能力,目前加氢站的氢气一次性利用率可提高到70%~75%。随着氢能源应用端需求的变化,加氢站加注压力将从35 MPa提高到70 MPa。目前,我国已经开始主攻70 MPa加氢站技术,首座利用风光互补发电制氢的70 MPa加氢站(同济-新源加氢站)在大连建成,集成了可再生能源现场制氢技术、90 MPa超高压氢气压缩和存储技术、70 MPa加注技术以及70 MPa加氢站集成技术^[20-23]。

1.4 用氢产业发展现状

在氢能源的应用端,氢气除应用于炼油、合成氨、合成甲醇等传统工业领域外,主要以氢燃料电池车的方式在交通领域、发电领域以及其他信息领域商业化应用。

1) 氢燃料电池车领域。目前燃料电池乘用车的市场化仍处于弱势,氢燃料电池乘用车普及的难点在于氢基础设施有限,氢气售价相对较高,导致使用率较低;电动乘用车技术发展较快以及充电桩部

署已趋规模化,使得燃料电池乘用车的竞争力相对处于弱势。而近年我国氢燃料电池商用车实现了快速发展,其发展速度明显快于氢燃料电池乘用车。通过近十几年的研发投入,我国燃料电池商用车技术逐渐趋于成熟,福田欧辉、郑州宇通、佛山飞驰、上汽大通等代表性公司生产的燃料电池客车正逐步开始市场化进程,同时氢燃料电池物流车也已具备商业化发展条件^[20-23]。

截至2020年底,我国已经拥有氢燃料电池商用车7729辆^[24],占全球近1/4(中国及全球氢燃料电池汽车数量如图2所示)。近年来,通过对关键材料和核心部件的攻关布局,我国氢燃料电池产业发展迅速,已经掌握了一批燃料电池相关核心技术,国内氢能源利用产业也呈现出快速发展的势头。

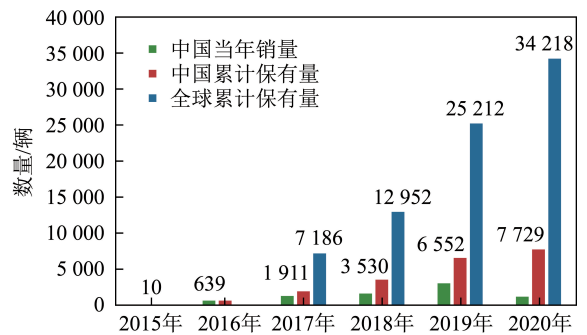


图2 中国及全球氢燃料电池汽车数量

Fig.2 Number of hydrogen fuel cell vehicles in China and the world

2) 发电领域。氢气用于发电主要有2种模式:一是氢气直接进入内燃机燃烧发电;二是通过大型燃料电池技术进行储能再发电,后者更受关注。燃料电池在固定发电方面的应用,包括分布式发电、热电联产系统和备用电源。其中,PEMFC(质子交换膜燃料电池)在家用热电联产系统中应用较多,PAFC(磷酸燃料电池)、MCFC(熔融碳酸盐燃料电池)全部应用于大型分布式电站,SOFC(固体氧化物燃料电池)在大型分布式电站和家用热电联产系统均有应用。相比于国外,我国在氢燃料电池发电领域并未有太多的布局与规划^[25]。

3) 其他新兴领域。其他氢能源应用的新兴领域包括天然气管网掺氢、氢储能等。天然气管网掺氢被认为是解决大规模风电/光伏消纳问题的有效途径,也是实现氢较低成本远距离输送的方法,目前天然气管网掺氢的研究在国内刚刚起步。氢储能技术被认为是智能电网和可再生能源发电规模化发展的潜在支撑,“十三五”期间氢储能概念列入国家电网公司规划,氢储能产业链条逐渐清晰,并在国内建

成第1个兆瓦级氢能源储能电站^[26-32]。

2 我国氢能源利用存在的问题

2.1 氢能源产业起步晚

与发达国家相比,我国在氢能源产业技术水平和建设规模上差距较大。以丰田、现代为代表的燃料电池乘用车和氢能源大巴、物流车的生产均处于全球领先水平;近2 a,美国在燃料电池汽车方面增速放缓,但加州作为燃料电池乘用车的最大单一市场仍在整个行业里占举足轻重的地位;欧洲的燃料电池研发起步很早,近年来奔驰等传统车企以及博世等一级供应商均已经进入燃料电池汽车领域。我国燃料电池系统发动机已接近国际先进水平。我国氢燃料电池汽车已经进入商业化导入期,商用车燃料电池寿命已经超过2万h,基本满足车辆运行条件;氢燃料电池发动机系统功率密度多项指标已达国际先进水平。但基础材料和核心零部件依赖于国外供应商,国产化开发亟待解决。与先进国家相比,总体在产业规模、产品性能、核心技术研发、材料制造及成本、标准体系、应用场景等方面均有一定差距。

2.2 “技术空心化”问题凸显

我国各地区氢能源产业的发展存在很大程度的同质化,普遍存在重应用、轻研发,重短期效果、轻长期投入,急于求成等问题。各地竞相开发氢能源,抓技术、挖人才、找项目,氢能源与燃料电池发展仍处于无序状态。燃料电池发动机系统供应链基础较为薄弱,尚未形成较成熟的零部件供应体系。燃料电池的关键材料包括催化剂、质子交换膜和碳纸等,材料大都依赖进口;膜电极、双极板、空压机、氢循环泵等与国外先进技术相比存在较大差距。仍需攻克基础材料、核心技术和关键部件难关,尤其是膜电极等关键部件的产业化。加氢机、压缩机、储氢、高压阀门等核心设备多采用进口,加氢站建设成本高。此外,氢的远距离运输迫切需要解决安全问题。储氢材料及储氢技术都是未来攻关的难点。燃料电池系统成本仍需降低,具有自主知识产权的核心燃料电池隔膜及电堆技术仍需突破。其中,整体煤气化燃料电池(IGFC)是煤炭发电的根本性变革技术,但我国投入不足、基础研究薄弱,导致技术产业化进程缓慢。

2.3 应用场景较为单一

受燃料电池发展技术、成本以及加氢站基础设施等因素影响,我国目前氢能源的应用场景集中在交通领域,主要在氢燃料电池商用车,落后于全球氢

能源产业化进程。2019年工信部道路产品推荐目录的燃料电池汽车产品中,商用车100款,乘用车0款;虽出现过燃料电池乘用车产品,但基本都停留在样车阶段。现有各地出台的氢能源和燃料电池发展规划大多围绕交通领域,商业模式和持续路径不明确。燃料电池在分布式能源、发电、供热、特种用途等众多领域的应用亟待探索。当前,众多国际业内巨头已经进入在华市场,国内市场竞争日趋激烈,一旦技术“空心化”,存在产业失守的风险。

2.4 产业发展商业模式尚待市场检验

氢能源产业处于起步阶段,氢能源全产业链条还未能打通,产运销等环节较分散,阻碍了产业的布局与发展。产业链企业主要分布在燃料电池零部件及应用环节,上游氢气储输及加氢基础设施薄弱,规模企业占比仅10%。加氢站高昂的建设运营成本无法通过规模经济效应平衡收支。下游应用除交通领域外,储能、分布式发电、工业、建筑等领域尚未开展氢能源应用示范。燃料电池车还存在技术开发不充分、产品性能不稳定,购置成本高、运营成本高、燃料成本高等问题。需要积极探索适合中国国情的氢能源商业化发展模式。在产业发展阶段,中国燃料电池汽车仍属于产业导入期,实现商业化仍是一个中长期的发展过程。目前形成了以上海为代表的长三角地区、以广东为代表的珠三角地区以及以北京为代表的京津冀地区。

3 我国氢能源利用前景与应用场景分析

3.1 发展条件基本判断

长期来看,氢能源产业未来的发展前景非常广阔,但根据目前发展状况判断,未来氢能源产业要立足于人类商业能源领域,需具备以下前提条件:①发展前期必须予以强力政策支持。包括资金补贴和示范项目,也包括氢能源在能源、环境质量和经济发展上适应国家发展的社会目标。②在产业链各个环节上,成本均具备一定竞争力,包括在供给环节上与化石能源的价格竞争,在储运及应用环节中与锂电池的竞争等。③技术安全可靠保障,包括技术安全保障、法律规范保障和提高社会认知接受度等。满足以上条件,进而提高氢能源产业竞争力的核心要素是增加投资以扩大规模、扩大氢能源价值链,需要包括政府、企业在内社会经济体全员参与和投入。

3.2 发展前景分析

未来30 a,中国氢能源产业发展前景可以按照3个阶段进行分析^[33]。

第1阶段(当前到2025年):政策引导局部示范导入期。该阶段属于氢能源产业发展导入期。在“以奖代补”政策的引导下,“十四五”期间,通过“十城千辆”的示范,建立氢能源和燃料电池汽车产业链,关键核心技术取得突破,逐步实现国产化。与此同时,氢能源行业将推动完成氢能源在中国的发展定位与战略目标,形成自上而下相对健全的行业发展指导意见、审批管理等政策,初步建立产业政策、监管方式、商业模式,为产业健康持续发展奠定基础。

第2阶段(2025—2035年):市场驱动商业模式培育期。该阶段属于氢能源产业发展市场培育期。在燃料电池系统价格下降、生产规模扩大、可再生能源在制氢过程中使用比例提升及加氢基础设施逐渐完善等多个因素的驱动下,燃料电池车对于商用车,尤其是重卡的成本将大幅下降,与电动车及燃油车相比,具有很强的市场竞争力,燃料电池有轨电车、燃料电池分布式电源也将参与到细分领域的市场竞争,整个氢能源产业将形成一定发展规模。探索固定式可再生氢能源系统的储存和管理,与其在交通出行领域的应用产生协同作用,形成高效、安全、低成本的供氢网络雏形,可为产业高质量持续发展奠定基础。在此阶段,氢燃料电池、制氢、加氢、运氢、储氢关键装备技术基本实现国产化;产业政策逐步健全、行业监管相对完善,商业模式较为成熟,产业处于市场驱动下有序竞争且日益发展的环境。

第3阶段(2035—2050年):产业生态绿色智慧成熟期。该阶段属于氢能源产业发展成熟期。可再生能源制氢成为核心氢源,氢气在这个阶段能够更系统地生产、储存、运输和分销。氢能源将同电动车和其他新兴技术一样,充分进入交通、电站和储能等各个细分市场参与竞争,在全球范围内实现将绿色能源转化为动力的系统解决方案。在这个阶段,社会生产系统将由不同的技术提供动力,氢能源产业将实现与工业、电力、建筑、交通行业不同程度的融合,最终实现电力与氢能源互补的能源供应体系。

3.3 应用场景分析

1) 交通领域^[34]。氢燃料电池车辆被认为是未来交通领域可持续发展的理想方案之一,根据交通工具质量及其运行范围,氢能源在交通领域的应用广泛,涉及乘用车、客运车、叉车、轻型卡车、重型卡车、城市轨道交通车辆、船舶等。

乘用车方面,应以技术改革创新为基础,包括燃料电池核心材料、燃料电池过程机理、燃料电池系统层级的集成技术和应用于整车层级的集成技术、关

键零部件以及基础设施等相关技术的研发,其目的是有效降低燃料电池乘用车的成本、提高可靠性和安全性。

商用车方面,是我国发展氢能源战略的重点方向和突破口,其在节能环保方面及车辆充电时间上具有不可替代的优势。同时,以商用车为先导发展,可为今后提升燃料电池车整体的技术优势、逐步降低生产成本、有效带动燃料电池乘用车的发展做好准备。随着相关技术的发展,燃料电池商用车的发展相比其他产业链更契合我国基本国情,通过打造燃料电池商用车平台,可以有效培育产业链,推进产业化。

特种车辆方面,长续航、大载重的重型卡车也逐渐成为电动化的重要领域。由于蓄电池车辆存在续航短、充电时间长、低温衰减快等缺陷,氢燃料电池成为重型卡车电动化领域更有前景的技术方案。已有能源企业正在开展110 t氢燃料电池矿用重卡的研制,重点研究高功率长寿命燃料电池堆的稳定性与可靠性,通过多套燃料电池系统的串并联提升动力系统的总功率。

轨道交通车辆方面,国家能源集团已立项开展重载铁路氢能源应用关键技术装备研发,正在研制基于氢能源动力的调车机车和氢能源动力接触网作业车,并配套研发重载铁路氢能源动力装备供氢技术,将大幅降低交通运输过程的碳排放。

船舶方面,氢燃料电池系统可用于多种用途船舶,包括游艇、公务船、渔船、货轮等。围绕氢燃料电池推进技术在节能、环保、安全、高效船舶推进装置领域的市场需求和发展趋势,以突破具有自主知识产权的船用氢燃料电池推进技术工程化为目标,实现船用氢燃料电池推进装置自主化和工程化,加快推进船舶工业转型升级,以适应高性能绿色船舶在内河、近海、远洋船舶领域的市场需求。

2) 电力领域^[35-37]。氢气用于发电主要有2种模式:一是燃气轮机直接掺入氢气发电,国内已有相关电力企业正在开展此方面的研究和示范。二是通过大型及分布式发电或调峰应用,在偏远地区或恶劣天气以及其他极端情况下,可以为电网或通信线路提供恒定的电力。

3) 冶金领域^[38]。钢铁行业是去产能、调结构、促转型的重点行业,将氢气加入钢铁企业的产业链中,以氢气(可再生能源制氢)全部或部分代替传统以碳为主的冶金工艺,能够从根本上解决现有冶金工艺的能源结构和排放,是当前钢铁行业低碳发展、能源变革的重要方向之一。

4) 煤化工领域。结合西北地区的大型风光基地和煤化工项目,利用可再生能源制取的氢气,开展现代煤化工和绿氢耦合技术和工程示范,探索煤制油化工产业绿色低碳转型发展路径^[39]。

5) 其他新兴领域。在无人机方面,氢燃料电池无人机可以作为长航时无人机的动力源,国内已有数十家企业提供无人机用氢燃料电池产品,续航时间超过以锂离子电池为动力的无人机2倍以上。在氢储能方面,依托沙漠、戈壁地区的大型风光光伏基地,开展风光氢储产业集群建设,可提升新能源利用效率,增强高比例可再生能源接入系统能力。

4 推进氢能源利用的战略举措和建议

4.1 战略举措

1) 契合国家战略,坚持规划引领。一方面要深刻认识氢能源产业高质量发展的客观要求。做好氢能源产业发展战略规划,以高质量发展为目标,培育新动能、打造新引擎。坚持把创新作为引领发展的第一动力,把创新摆在氢能源产业发展全局的核心位置,大力推动氢能源产业的蓬勃发展,加强与传统产业的广泛融合,持续引领产业中高端发展和经济社会高质量发展。另一方面要坚持战略引领和安全发展原则,紧跟新一轮科技革命和产业变革,系统研究氢能源产业政策、市场、技术走向,切实增强氢能源产业发展趋势前景预见性,准确把握氢能源产业布局方向,严防战略风险。

2) 突出平台效应,协同创新发展。以资本为纽带、以产权为基础依法自主开展改革创新,坚持市场化手段推进改革创新,提升运营效率;发挥好各类核心氢能源产业化平台作用,将氢能源产业打造成吸引全球能源资源的窗口和汇集氢能源行业优质合作伙伴的开放平台,平台要通过氢能源产业与传统产业的广泛融合,推动传统产业转型升级,培育壮大新动能^[40-41]。

3) 坚持科技创新,深化产学研合作。一是充分发挥科技创新在全面创新中的引领作用。利用优质科技资源,攻关氢能源产业核心关键技术;加强科技创新研发投入,加强科技项目过程管理,聚焦氢能源产业中具有先进性和创新性的技术,努力实现关键核心技术国产化;二是加强与国内外著名高校、科研院所以及领先企业的协同创新,充分利用全球科技资源,广泛采取合作研发、技术并购、战略联盟等多种方式引进外部技术,建立全球化的研发模式,积极参与“一带一路”建设,加强国际合作和关键技术开发力度,推进成果转化和技术输出。

4) 健全人才机制,打造核心优势。一是健全氢能源产业领域的人才激励机制,推行中长期激励办法,充分体现氢能源产业领域紧缺的人才价值,激发人才活力;二是按照“统筹考虑、适度超前”的原则,逐步加大一流学科人才特招和重点专业人才直招力度,形成一批技术过硬的成熟人才;三是加强对外交流与合作,营造开放、流动、竞争的科研氛围,充分调动科技人员的积极性和创造性,培养造就一批具有国际水平的战略科技人才、科技领军人才、青年科技人才和高水平创新团队。

4.2 发展建议

1) 强化氢能源在国家能源体系中的重要地位。
① 出台氢能源产业发展专项规划及实施路线图,加强氢能源行业管理,加强行业发展协调与监管。目标到2025年,燃料电池汽车和车用氢能源达到国际先进水平、初步商业化,储能调峰、分布式发电、热电联供等领域实现核心技术突破和规模示范;到2030年,燃料电池汽车得到大规模推广,其他领域全面开启商业化进程,清洁低碳的氢能源制储运及应用技术体系基本健全;到2045年,氢能源得到大范围普及应用,成为能源体系的关键支撑,基本建立氢电互补的终端用能体系。
② 建立科学长效的产业发展扶持与激励政策,坚持市场主导与政策驱动并行,逐步建立科学合理的产业补贴政策与相关机制。应研究系列相关税收、基础设施建设补贴等政策机制;拓宽产业投融资渠道,鼓励政府金融平台与社会资本加入的多元化投资体系,支持设立产业发展专项基金;支持前沿性氢能源设施装备制造、率先采用国家科技专项成果的储运及加氢项目资金奖励、风险补偿与融资贴息等支持。
③ 成立全国性一级氢能源协会。目前,由于中央政策的支持,各地竞相开发氢能源,抓技术、挖人才、找项目,氢能源与燃料电池发展处于无序状态。成立国家级氢能源与燃料电池协会,集中资源规划全国氢能源与燃料电池发展,制定路线图、行业标准与规范等,既可做好氢能源行业自律,又可为政府服务,提供可信用高的咨询意见、政策建议等。

2) 加强核心技术自主研发与技术标准体系建设。
① 设立氢能源与燃料电池国家科技重大专项,协同攻关掌握氢能源关键核心技术。面向2030年重大科技项目的研发需求,建议设立固体氧化物燃料电池等重大专项,布局氢能源与燃料电池领域国家重点实验室,推动关键材料、关键技术开发迭代。推进重载商用车及其氢系统、站用关键装备研发验证。加大“可再生能源制氢与工业部门深度脱碳”

科技攻关力度。建立一批工业领域氢能源利用综合示范工程。② 高标准、严格规范氢能源产业链安全与应急管理体系建设,积极开展务实国际合作。同步建立产品检测和认证机制。推动支持开展联盟标准、行业标准研究,加快构建国家标准、行业标准和联盟标准相结合的标准化协同创新机制。充分利用全球创新资源,积极参与全球燃料电池技术和产业创新合作,尤其是国际标准体系建设和标准研制。

3) 因地制宜选择氢能源产业发展路线。① 坚持交通领域推广为先导、核心技术突破为关键、氢能源基础设施为支撑、氢能源供给体系紧密衔接、其他行业应用梯次跟进,逐步建立健全我国氢能源产业生态。加快推进褐煤制氢,高效大容量燃料电池系统,氢燃料电池交通领域公交、物流、环卫等商务用车的产业化进程,优先开展物流车“柴改氢”示范工程。优先在重点地区和相关领域推进柴改氢试验示范,支持交通领域多场景应用,逐步完善产业链体系示范。② 拓宽氢能源与燃料电池在城市(区域)、企业、家庭等不同场景的分布式应用,全面推动氢能源社会发展。结合城市和企业、家庭在电力、取暖的需求差异性,推广多元化的氢能源应用。要根据区域的能源消费结构、可再生能源赋存条件和生态环境约束等综合特征,科学合理规划天然气管道掺氢、分布式热电联产、可再生能源制氢等氢能源与燃料电池在不同场景的应用推广。针对地区、企业、医院、学校和家庭等不同对象制定差异化的氢能源应用优惠政策。促进氢能源领域的军民融合。

4) 适当引导国有资本在氢能源产业的优化布局。① 应坚持稳妥有序进入原则。国有资本相关企业原则上应在原有产业的基础上适时、合理进入氢能源产业,做前瞻性战略布局。应做好相关企业的协同发展,避免一哄而上、无序竞争。应尊重市场规律、遵循市场规则,根据氢能源产业链不同特点和应用场景,有序引导国有资本采用资本运作、产业运营、综合服务总包等各种灵活形式稳妥、有序布局氢能源产业。② 应加强产学研用联合攻关。中央企业应当联合申请设立氢能源与燃料电池国家科技重大专项,协同攻关掌握氢能源关键核心技术。国有资本应重点投入氢能源产业链关键环节,掌握关键核心技术工艺与材料装备,打破国外的技术壁垒,减少对外依赖;应重点投入投资强度大、具有基础支撑作用的运输体系、加氢站等基础设施领域。同时,充分鼓励其他主体进入氢能源产业链各类细分领域,建立一种市场响应快、协同强的发展模式,培育一个健康可持续的氢能源生态圈。③ 有针对性地施以

必要的考核引导。在氢能源产业导入期(还未成熟时期),可采用对央企氢能源示范工程和基础研究费用均认定为研发投入计入研发经费投入强度考核范畴,或可直接按一定比例视同利润核减考核指标。在产业培育期,在有其他国家产业奖励激励政策情况下,适度设定类似营收、利润占比之类考核指标,产业成熟期或失败期(退潮期)应果断退出考核。④ 加强国有资本监管,确保国有资本多维度回报。注意协调国有资本在氢能源投资领域的规模与方向,避免燃料电池领域国有资本同业竞争。外部注意协调国有资本与民间资本、外资等各种经济成分的合作。构建国有资本在氢能源产业规范化专业化管理体系,构建国有资本在氢能源产业高效运营新机制,保持国有资本在氢能源领域的规模效应,确保国有资本多维度回报率,实现国有资本的保值增值。⑤ 引入混改机制,提升产业发展效率。国有企业具有资金雄厚、平台宽阔、应用场景丰富的先天优势,但在人才激励机制、技术选择效率等方面受限较多,可适时、适度、有选择地引入混改机制,在国家监督管理的前提下,加强与民间企业、海外企业的协同配合,扬长避短,合理探索氢能源产业开发新模式,共同提高产业发展效率,打造氢能源社会体系。

5 展 望

《关于2019年国民经济和社会发展计划执行情况与2020年国民经济和社会发展计划草案的报告》指出,将制定国家氢能源产业发展战略规划,相关实施意见近期会陆续出台,并通过持续的技术攻关与规模化示范,结合全国已有6省(自治区)24市发布氢能源规划和指导意见,判断“十四五”期间,我国将量化氢能源在我国能源体系的发展目标,形成自上而下相对健全的行业发展指导意见、发展路径及保障措施,氢能源产业将进入可持续健康发展通道。

参考文献(References):

- [1] 国家能源局.中华人民共和国能源法(征求意见稿)[EB/OL].(2020-04-10)[2022-01-30].http://www.nea.gov.cn/2020-04/10/c_138963212.htm.
- [2] 深圳市人民政府.深圳市氢能产业发展规划(2021—2025年)[EB/OL].(2021-12-17)[2022-01-30].http://fgw.sz.gov.cn/zwgk/qt/tzgg/content/post_9459760.html.
- [3] 大连市人民政府.大连市氢能产业发展规划(2020—2035年)[EB/OL].(2020-11-05)[2022-01-30].https://www.dl.gov.cn/art/2020/11/5/art_854_443290.html?xxgkhide=1.
- [4] 长治市人民政府.长治市氢能产业发展规划(2020—2030年)[EB/OL].(2020-10-19)[2022-01-30].https://www.changzhi.gov.cn/xxgkml/czsmz/zcjd_204349/202012/t20201209_

- 2201022.shtml.
- [5] 青岛市人民政府. 青岛市氢能产业发展规划(2020—2030年) [EB/OL]. (2020-12-14) [2022-01-30]. http://www.qingdao.gov.cn/zwgk/xxgk/fgw/gkml/gwfg/202012/t20201221_2845984.shtml.
- [6] 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 Xiao,ZHANG Xinghua,YAN Huaguang, et al. Current situation and prospect of global hydrogen energy industry policy[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(12):27-34.
- [7] Bloomberg N E F. Hydrogen: The economics of production from renewables [R]. New York: Bloomberg Financial, 2019.
- [8] 张全斌,周琼芳.基于“碳中和”的氢能应用场景与发展趋势展望[J].中国能源,2021,43(7):81-88.
ZHANG Quanbin,ZHOU Qiongfang. Application scenario and development trend of hydrogen energy based on "carbon neutralization" [J]. Energy of China, 2021, 43(7):81-88.
- [9] 中国氢能联盟. 中国氢能及燃料电池产业白皮书2020 [M]. 北京:人民日报出版社,2021.
- [10] 邓甜音,何广利,缪平.不同应用场景的电解水制氢成本分析[J].能源化工,2020,41(6):1-5.
DENG Tianyin,HE Guangli,MIU Ping. Cost analysis of hydrogen production from water electrolysis in different application scenarios[J]. Energy Chemical Industry, 2020, 41(6):1-5.
- [11] 李子烨,劳力云,王谦.制氢技术发展现状及新技术的应用进展[J].现代化工,2021,41(7):86-89.
LI Ziyue, LAO Liyun, WANG Qian. Development status of hydrogen production technologies and application advances of new technologies [J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(7):86-89.
- [12] 谢继东,李文华,陈亚飞.煤制氢发展现状[J].洁净煤技术,2007,13(2):77-81.
XIE Jidong,LI Wenhua,CHEN Yafei. Development current situation of hydrogen from coal [J]. Clean Coal Technology, 2007, 13(2):77-81.
- [13] 黄格省,李锦山,魏寿祥,等.化石原料制氢技术发展现状与经济性分析[J].化工进展,2019,38(12):5217-5224.
HUANG Gesheng,LI Jinshan,WEI Shouxiang, et al. Status and economic analysis of hydrogen production technology from fossil raw materials [J]. Chemical Industry and Engineering Process, 2019, 38(12):5217-5224.
- [14] 王辅臣.煤气化技术在中国:回顾与展望[J].洁净煤技术,2021,27(1):1-33.
WANG Fuchen. Coal gasification technologies in China: Review and prospect [J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(1):1-33.
- [15] 李家全,刘兰翠,李小裕,等.中国煤炭制氢成本及足迹研究[J].中国能源,2021,43(1):51-54.
LI Jiaquan,LIU Lancui,LI Xiaoyu, et al. Research on the cost and carbon footprint of hydrogen production from coal in China [J]. Energy of China, 2021, 43(1):51-54.
- [16] 曹军文,覃祥富,耿喆,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 Junwen, QIN Xiangfu, GENG Ga, et al. Current development status and prospect of hydrogen storage and transportation technology [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 37(6):1461-1478.
- [17] 霍现旭,王靖,蔺葵,等.氢储能系统关键技术及应用综述[J].储能科学与技术,2016,5(2):197-203.
HUO Xianxu, WANG Jing, JIANG Ling, et al. Review on key technologies and applications of hydrogen energy storage system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(2):197-203.
- [18] 王庆一. 2020 能源数据 [R]. 北京:绿色创新发展中心,2021.
- [19] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴 2019 [M].北京:中国统计出版社,2020.
- [20] FERNANDES M D, BISTRITZKI V, DOMINGUES R Z, et al. Solid oxide fuel cell technology paths: National innovation system contributions from Japan and the United States [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 127:109879.
- [21] 刘应都,郭红霞,欧阳晓平.氢燃料电池技术发展现状及未来展望[J].中国工程科学,2021,23(4):162-171.
LIU Yindong, GUO Hongxia, OUYANG Xiaoping. Development status and future prospects of hydrogen fuel cell technology [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(4):162-171.
- [22] YI Y, RAO A D, BROUWER J, et al. Analysis and optimization of a solid oxide fuel cell and intercooled gas turbine (SOFC-ICGT) hybrid cycle [J]. Journal of Power Sources, 2004, 132:177-285.
- [23] 侯明,衣宝廉.燃料电池技术发展现状与展望[J].电化学,2012,18(1):1-13.
HOU Ming, YI Baolian. Progress and perspective of fuel cell technology [J]. Journal of Electrochemistry, 2012, 18(1):1-13.
- [24] 谭旭光,余卓平.燃料电池商用车产业发展现状与展望[J].中国工程科学,2020,22(5):152-158.
TAN Xuguang, YU Zhuoping. Development status and prospects of fuel cell commercial vehicle [J]. Industry Strategic Study of CAE, 2020, 22(5):152-158.
- [25] 黄雨涵,丁涛,李雨婷,等.碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J].中国电机工程学报,2021,41(S1):28-51.
HUANG Yuhan, DING Tao, LI Yuting, et al. Summary of energy low-carbon technology under the background of carbon neutralization and Its Enlightenment to the development of new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1):28-51.
- [26] 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 He, LIANG Kun, ZHANG Guosheng, 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.
- [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):12-15,45.
WANG Hongjian, XIONG Sijiang, ZHANG Xiaorui, et al. Application status and analysis of technology for blending hydrogen into natural gas [J]. Gas & Heat, 2021, 41(10):12-15,45.
- [28] 朱建鲁,周慧,李玉星,等.掺氢天然气输送管道设计动态模拟[J].天然气工业,2021,41(11):132-142.

- ZHU Jianlu, ZHOU Hui, LI Yuxing, et al. Dynamic simulation of hydrogen blending natural gas transportation pipeline design [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(11): 132-142.
- [29] 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 Juan, LU Yanghui, ZHENG Jinyang, 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.
- [30] 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 Ping, WU Yi, LI Changjun, et al. Research progress on pipeline transportation technology of hydrogen - mixed natural gas [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(4): 361-370.
- [31] 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 Qianyu, CHEN Zhiguang. The safety research on blending hydrogen into natural gas pipeline [J]. *Urban Gas*, 2021(4): 19-26.
- [32] 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 Ruoxuan, YOU Shuangjiao, ZHU Xinyu, et al. Development status and prospects of hydrogen compressed natural gas transportation technology [J]. *Petroleum and New Energy*, 2021, 33(4): 26-32.
- [33] 凌文, 刘玮, 李育磊, 等. 中国氢能基础设施产业发展战略研究[J]. *中国工程科学*, 2019, 21(3): 76-83.
- LING Wen, LIU Wei, LI Yulei, et al. Development strategy of hydrogen infrastructure industry in China [J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(3): 76-83.
- [34] TANG B J, LI X Y, YU B Y, et al. Sustainable development pathway for intercity passenger transport: A case study of China [J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113632.
- [35] 许世森, 张瑞云, 程健, 等. 电解制氢与高温燃料电池在电力行业的应用与发展[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(9): 2531-2537.
- XU Shisen, ZHANG Ruiyun, CHENG Jian, et al. Application and development of electrolytic hydrogen production and high temperature fuel cell in electric power industry [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(9): 2531-2537.
- [36] TU Q, BETZ R, MO J L, et al. The profitability of onshore wind and solar PV power projects in China: A comparative study [J]. *Energy Policy*, 2019, 132: 404-417.
- [37] 符冠云, 郁聪, 白泉. “氢能热”下的“冷思考”: 谨防化石能源制氢形成的高碳锁定效应[J]. *中国经贸导刊*, 2019(12): 44-47.
- FU Guanyun, YU Cong, BAI Quan. "Cold thinking" under "hydrogen heat": Beware of the high carbon lock-in effect of hydrogen production from fossil fuels [J]. *China Economic & Trade Herald*, 2019(12): 44-47.
- [38] KADIAN R, DAHIYA R P, GARG H P. Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi [J]. *Energy Policy*, 2007, 35(12): 6195-6211.
- [39] 王钰, 李志坚. 我国现代煤化工“十三五”科技创新方向探讨[J]. *化学工业*, 2016, 34(4): 5-15.
- WANG Yu, LI Zhijian. Discussion on the scientific and technological innovation direction of China's modern coal chemical industry during the "13th five year plan" [J]. *Chemical Industry*, 2016, 34(4): 5-15.
- [40] 国际氢能委员会, 中国氢能联盟. 氢能平价之路[R]. 北京: 中国氢能联盟, 2020.
- [41] 何建坤. 中国低碳发展战略与转型路径研究项目成果[R]. 北京: 清华大学气候变化与可持续发展研究院, 2020.